

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет електроніки**

**Кафедра електронних приладів та пристроїв**

«На правах рукопису» УДК 535.2, 535.8

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

“ ” Л.Д. Писаренко  
2018 р.

**Магістерська дисертація  
зі спеціальності 171 –Електроніка  
Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»**

на тему: **«Волоконно-оптичний датчик з розподіленими  
параметрами»**

**Виконав:**

Студент 2 курсу, гр. ДЕЗ-71мп **Ільченко Анастасія Тарасівна**

**Науковий керівник:**

Доцент, канд. техн. наук., с.н.с. **Чадюк В.О.**

**Консультант:**

\_\_\_\_\_  
**Рецензент:**

\_\_\_\_\_  
Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018

**Національний технічний університет України**

**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) Електроніки

Кафедра Електронні прилади та пристрої

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – **171 – Електроніка (Електронні прилади та пристрої)**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

Л.Д. Писаренко

«        »

2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Ільченко Анастасії Тарасівні**

**1. Тема дисертації** «Волоконно-оптичний датчик з розподіленими параметрами» науковий керівник дисертації доцент, канд. техн. наук., с.н.с.

Чадюк В.О., затверджені наказом по університету від «07» 11 2018 р. № 4115-  
с.

**2. Строк подання студентом дисертації:** «        » 2018 р.

**2. Об'єкт дослідження:**

**3. Предмет дослідження:**

**4. Перелік завдань, які потрібно виконати:**

**5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**  
структурна схема системи живлення, електрична принципова схема.

**6. Дата видачі завдання: 01.02.2018 р.**

**Календарний план**

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по волоконно-оптичних датчика з розподіленими параметрами	10.02. 2018	
2.	Розробка алгоритму функціонування, функціональної схеми	28.02.2018	
3.	Розробка структурної системи	15.03.2018	
4.	Оформлення пояснювальної записки та плакатів. Підготовка доповіді.	05.10.2018	

Студент гр. ДЕ-71мп

А.Т. Ільченко

Науковий керівник дисертації

В.О. Чадюк

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	1
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	7
ВСТУП.....	8
1. ОГЛЯД ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ.....	10
1.1. Властивості оптичних волокон .....	10
1.2. Типи волоконно-оптичних датчиків. ....	19
Висновок.....	25
2. АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ ДАТЧИКІВ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ .....	27
2.1. Спектральні властивості бреггівських ґраток .....	27
2.2. Волоконна бреггівська ґратка як чутливий елемент.....	32
2.3. Джерело випромінювання для бреггівського датчика.....	33
2.4. Цифрова камера бреггівського датчика .....	38
Висновок.....	41
3. ДАТЧИК З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ .....	42
3.1. Структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами .....	42
3.2. Вибір джерела випромінювання для датчика з розподіленими параметрами.....	43
3.3. Розрахунок чутливості датчика з розподіленими параметрами .....	45
Висновок.....	47
4. ТЕХНОЛОГІЯ ДАТЧИКА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ.....	48
4.1. Технологія виготовлення одномодового волокна .....	48
4.2. Технологія створення бреггівських ґраток в оптичному волокні .....	55
Висновок.....	61
5. ПРОПОЗИЦІЯ ДО СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	62
Висновок до стартап-проекту.....	62
ВИСНОВОК.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	64

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ВОД – волоконно-оптичний датчик, (optical fiber sensors) – це оптоволоконні пристрої для детектування деяких величин, які використовують основним елементом оптичне волокно як в якості лінії передачі даних, так і в якості чутливого елемента;

ДС – джерело світла;

ОВ – оптичне волокно, – нитка з оптично прозорого матеріалу, за звичай скло та пластик, яка використовується для перенесення світла усередині себе за допомогою повного внутрішнього відображення;

БВ – багатомодові волокна;

ОДВ – одномодові волокна;

СД – світлодіод;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВБГ – волоконна бреггівська ґратка;

ПЗ – показник заломлення;

NA – Numerical Aperture;

WDM – Wavelength Division Multiplexing;

TDM – Time Division Multiplexing;

ПЗЗ – прилад із зарядним зв'язком;

ЗП – запам'ятовуючий пристрій;

## ВСТУП

Вважається, що термін ВОД з'явився лише на початку 80-их років, тоді і сформувався цей тип датчиків як один із напрямків техніки. Незважаючи на це, створення датчиків на основі оптичних волокон почалось ще до середини 70-х років, а публікації з прийнятними розробками та експериментальними зразками з'являлись у другій половині 70-их років.

Основними елементами волоконно-оптичного датчика є оптичне волокно, світловипромінюючі (ДС) і світлоприймаючі пристрої, оптичний чутливий елемент. І тому вони не випромінюють і не проводять електричний струм та не схильні до електромагнітних перешкод.

Якщо класифікувати волоконно-оптичні датчики за застосуванням в них оптичного волокна, то їх можна розподілити на датчики, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі, і датчики, в яких воно використовується чутливим елементом. У датчиках типу «лінії передачі» використовуються найчастіше багатомодові оптичні волокна, а в датчиках сенсорного типу зазвичай - одномодові.

В усьому світі в даний час інтенсивно ведуться роботи зі створення оптичних систем обробки і передачі інформації. У таких системах використовуються волоконно-оптичні датчики-перетворювачі різних фізичних величин. Розвиток оптичних систем передачі інформації пов'язан, як з чудовими властивостями цих систем, так і з особливостями різних галузей науки і техніки.

Наступні чотири глави присвячені розгляду принципів дії і основ, на яких базується робота установки ВОД з розподіленими параметрами, розглянуті різні типи оптичних датчиків та охарактеризовані їх властивості. Описані елементи ВОД з розподіленими параметрами, розглянуті особливості, параметри та характеристики елементів, розрахована чутливість датчика.

В електронних системах дуже часто контроль, регулювання і передачу

фізичних величин здійснюють за допомогою електричних сигналів, тому що вони є найбільш зручними для побудови різних автоматичних пристроїв, забезпечуючи високу швидкість передачі, дистанційність, сумісність і подальшу обробку .

Датчик на бреггівських ґратах новий та мало досліджений типом датчиків, який ряд переваг, які викликають до них значний інтерес і вже забезпечують їх практичне застосування.

Мета дипломної роботи :

- ознайомлення з поняттям волокно-оптичних датчиків, його властивостями, перевагами та недоліками.
- Розглянути ВОД з розподіленими параметрами, його конструкцію, розрахувати параметри.
- аналіз отриманих результатів;

# 1. ОГЛЯД ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

## 1.1. Властивості оптичних волокон

Оптичне волокно складається із серцевини, по якій розповсюджується світло, та оболонки (рис. 1.1), яка забезпечує відбивання світла в серцевину волокна таким чином, щоб світлові хвилі поширювалися тільки по серцевині волокна. Будь-які додаткові покриття (оболонки) є захисними. Серцевина зазвичай виготовляється або зі скла, або з пластика.



Рис. 1.1. Структура оптичного волокна та розповсюдження світла в ньому

Чим більше діаметр серцевини, тим більша кількість світла може бути передано по волокну. Захисна оболонка (покриття) забезпечує міцність волокна, поглинання ударів і додатковий захист волокна від впливу навколишнього середовища. Коефіцієнт заломлення  $n_1$  серцевини лише незначно перебільшує коефіцієнт заломлення  $n_2$  оболонки, тому світло, яке входить з торця волокна, повністю відображується від границі серцевини та оболонки, тобто розповсюдження проходить тільки в серцевині. Для повного внутрішнього відбиття світла, що входить в волокно під кутом  $\theta$ , необхідно, щоб виконувалась умова:

$$0 \leq \theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \theta_{\max}, \quad (1.1)$$



Оскільки різниця потенціалів між коефіцієнтами заломлення в серцевині та оболонки знаходиться в межах 0,01, то величину  $\theta_{\max}$  можна представити у вигляді:

$$\theta_{\max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1.2)$$

Це максимальний можливий кут, під яким світло може проходити в оптичне волокно, тобто прийматися ним. Називається такий кут числовою апертурою

позначається  $NA$  (Numerical Aperture).

При розгляді оптичних волокон замість різниці  $n_1$  і  $n_2$  частіше за використовується величина, що називається відносною різницею коефіцієнтів заломлення.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx n_1/n_2 - 1, \quad (1.3)$$

Якщо використовувати значення  $\Delta$ , то залежність між  $NA$  та  $\Delta$  може бути представлена наступним чином

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (1.4)$$

Відносна різниця коефіцієнтів заломлення  $\Delta$  зазвичай виражається в процентах.

У середині волокна оптичні проміння розповсюджуються, багаторазово повністю відображаючись. Однак, розповсюдження відбувається у тому випадку, коли вони проходять під певними кутами. Таке розповсюдження характеризується модою, яка визначає тип розподілу електромагнітного поля. Треба звернути увагу на те, що мода має взаємозв'язок з оптичними променями, на рис. 1.2 зображено поширення оптичних променів в пластинчастому хвилеводу. Розповсюджуючись світлова хвиля являється горизонтально поляризованою та має відносно осі хвилеводу нахил  $\psi$ . Звідси хвильовий фронт перпендикулярний напрямленню світла.

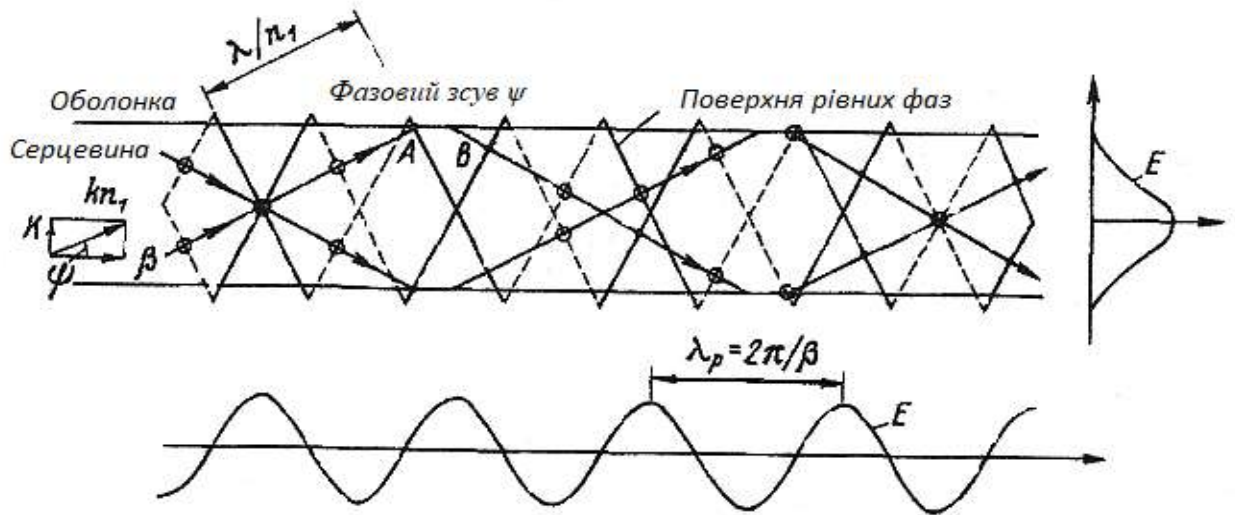


Рис.1.2 Відповідність між світловим променем і модою

На рис. 1.2 суцільною лінією позначена фазова поверхня з позитивним електричним полем, а штриховою лінією – з негативним полем. Вважаючи, що горизонтально поляризована хвиля в вакуумі має довжину  $\lambda$ , то в серцевині з коефіцієнтом заломлення  $n_1$  довжина хвилі зменшується до  $\lambda/n_1$ , а постійне розповсюдження хвилі  $k/n_1$  ( $k=2\pi/\lambda$ ), навпаки, збільшується, притому постійна поширення уздовж осі:

$$\beta = kn_1 \cos \psi, \quad (1.5)$$

Якщо повне відбиття світла, падаючого в точку А (рис. 1.2) можливо з'ясувати, що незначна частина енергії цього світла все ж таки проникає в оболонку. Тому можна пояснити, що у точці В трохи зрушена фаза відносно точки А, уздовж горизонтальної осі. При цьому фаза відбитої хвилі також змінюється на деяку величину  $\psi$ , залежну від кута падіння світлового променя. Цей зсув відбитої хвилі і зміна її фази називається зсувом Гуса–Хенхена (Goos–Hänchen).

На рис. 1.2 спрощено показані умови поширення основної моди. В центральній частині серцевини інтенсивність електричного поля збільшується та досягає максимуму внаслідок складання позитивних (можливо негативних) фазових фронтів світлових променів. Або навпаки, поблизу границі сердечник – оболонка позитивні і негативні фазові фронти

взаємно компенсуються і електричне поле прямує до нуля. При таких умовах розподілу електричного поля світла уздовж вертикальної осі представляє із себе стоячу хвилю. Цей розподіл багаторазово повторюється уздовж горизонтальної осі з періодом  $\lambda_p = 2\pi/\beta$ . Для утворення стоячої хвилі необхідно, щоб при дзеркальному відображенні світлової хвилі вгору чи вниз сума змін фази по вертикалі в ході просування хвилі за період відбиття і внаслідок зсуву Гооса-Генхена була б кратна  $2\pi$ . Таким чином, для формування моди кут розповсюдження світової хвилі не може бути довільним, і тільки світлові хвилі, у яких кут задовольняє вищезазначених умов, можуть поширюватись.

При описанні характеристик оптичних волокон одним з важливих параметрів являється нормована частота. По її значенню можливо стверджувати на скільки багато мод може поширюватись в оптичному волокні. Нормована частота позначається  $v$  і визначається за формулою:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} , \quad (1.6)$$

Для описаних нижче оптичних волокон із ступінчастою зміною коефіцієнта заломлення значення  $v = v_c = 2,405$  являється граничною ( $v_c$ -нормована частота зрізу). Якщо дійсне значення  $v$  волокна менше, то розповсюджується одна мода, а якщо більше – поширюється багато мод. Тому  $v_c$  визначає умови існування в оптичному волокні однієї моди, або умови зрізу мод більш високих порядків. Величина

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{v_c} a n_1 \sqrt{2\Delta} , \quad (1.7)$$

називається довжиною хвилі зрізу. Оптичні волокна в області с довжиною, більшою  $\lambda_c$ , працюють в одномодовому режимі.

Зразки оптичних волокон наведені на рис. 1.3. Зображені багатомодові оптичні волокна у яких нормована частота становить декілька десятків ( $v \approx 30$ ) і в яких поширюються багато мод, а також одномодові оптичні волокна зі значенням  $v$  більше 2,4, в яких поширюється лише одна мода.

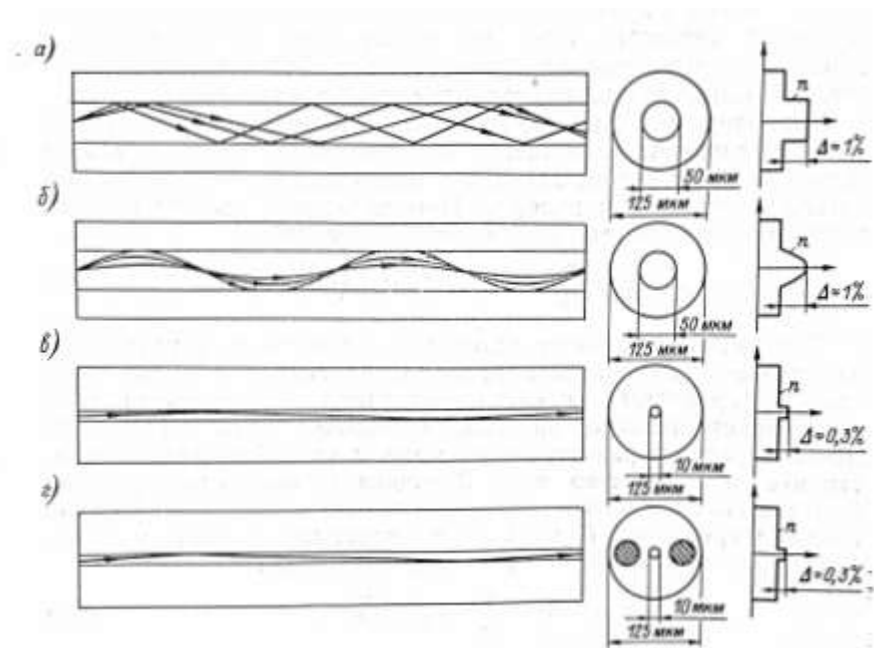


Рис. 1.3. Типи оптичних волокон: а – ступінчасте багатомодове; б – градієнтне багатомодове; в – одномодове; г – з подвійним променезаломленням.

**Багатомодові волокна** за характером розподілу коефіцієнта заломлення всередині серцевини діляться на волокна з ступінчастим розподілом та плавним (градієнтним). Обидва типи волокна мають діаметр серцевини 50 мкм і велику (приблизно 1%) відносну різність коефіцієнтів заломлення, що обумовлює такі переваги, як висока ефективність з'єднання з джерелом світла і порівняльна простота з'єднання з такими ж оптичними волокнами.

Для волокон зі ступінчастим розподілом швидкість поширення моди уздовж осі волокна  $v_g = (c/n_1) \cos \psi$  (де  $c$  – швидкість світла у вакуумі), тобто зі збільшенням порядку моди швидкість її поширення зменшується. Оскільки швидкість поширення кожної моди, збудженої при вході в волокно, залежить від її порядку, на виході волокна світловий імпульс буде більш широкий ніж на вході.

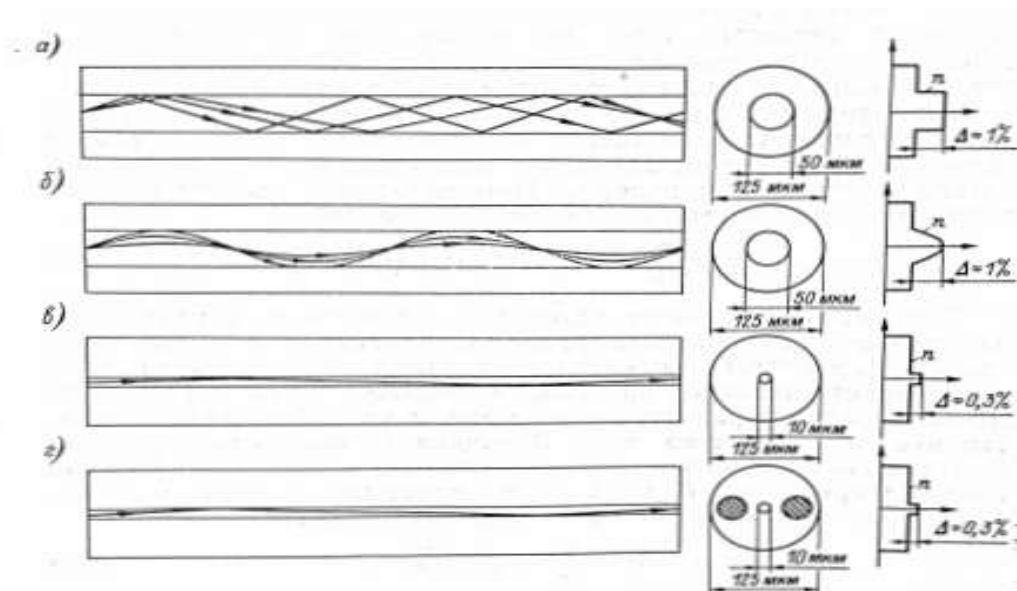


Рис 1.3. Типи оптичних волокон: а – ступінчасте багатомодове; б – градієнтне багатомодове; в – одномодове; г – з подвійним променезаломленням.

Різниця в часі поширення між модою самого вищого порядку, яка може поширюватись, і модою самого низького порядку з урахуванням критичного кута  $\psi_c = \cos^{-1}(n_2/n_1)$  виражається формулою:

$$\delta\tau = \frac{n_1 L}{c} \left( \frac{1}{\cos \psi_c} - 1 \right) \approx \frac{n_1 L}{c} \Delta, \quad (1.8)$$

де  $L$  – довжина волокна.

Отже, частотна полоса  $B$  сигналу, який можна передати ступінчастому багатомодовому волокну, визначається із виразу

$$BL = \frac{L}{\delta\tau} \frac{c}{n_1 \Delta}, \quad (1.9)$$

В градієнтному оптичному волокні світло розповсюджується завдяки тому, що коефіцієнт заломлення серцевини знижує до його периферії за квадратичним законом. Місце, де промінь змінює свою траєкторію при відображенні, віддаляється від осі серцевини по мірі збільшення кута розподілу. Оскільки швидкість світла в середовищі обернено пропорційна коефіцієнту заломлення цього середовища, світловий промінь, що розповсюджується ближче до осі волокна і має більш низку моду, через більш високий коефіцієнт заломлення поблизу осі буде мати меншу швидкість.

Навпаки, світлові промені мод більш високого порядку, що відбиваються далі від центральної осі і що проходять за один цикл відбиття більший шлях, ніж промені з модою низьких порядків, просуваються доволі швидко, так як проходять через частину серцевини з меншим коефіцієнтом заломлення. В наслідок чого швидкість розповсюдження уздовж осі волокна променів з різними модами приблизно однакова. Тому часова різниця в поширенні світлових променів з модами найменшого і найбільшого порядку для градієнтних волокон менше, ніж для ступінчастих, і записується як

$$\delta\tau \approx \frac{n_1 L}{c} \frac{\Delta^2}{2}, \quad (1.10)$$

Дивлячись на формули, можна помітити, що різниця в часі поширення для градієнтного волокна порівняно з різницею для ступінчастих волокон зменшується в  $\Delta/2$  разів. Маємо формулу

$$BL = \frac{2c}{n_1 \Delta^2}, \quad (1.11)$$

Необхідно відмітити, що в багатомодових волокнах із-за поширення світла у вигляді декілька сотень мод його поляризація випадкова, і в таких волокнах неможливо використовувати поляризацію або фазу світла. Тому використовують цей тип волокон в датчиках для виміру характеристик ефектів, при яких змінюється інтенсивність світла.

**Одномодові волокна** працюють мають діаметр серцевини не більше 10мкм, а відносну різницю коефіцієнтів заломлення має приблизно 0,3%. Оболонка має діаметр 125 мкм і складається з матеріалу з легуючими добавками, що змінюють показник заломлення. Ці волокна проектується та, щоб їх нормована частина  $v$  була менша 2,4 В. На відмінну від багатомодових волокон у одномодових відсутня тимчасова різниця в поширенні мод, тому вони надзвичайно широкосмугові (в декілька разів десятків, а то і сотень раз більше, ніж градієнтні волокна). Основним чинником, що обмежує ширину смуги одномодових оптичних волокон є зміна коефіцієнт заломлення матеріалу для різних по довжині хвиль, що

проходить, в результаті чого ширина полоси обернено пропорційна ширині спектра джерела світла.

В ОДВ можуть використовуватись поляризація та фаза, що дуже цінно для застосування цих волокон в датчиках. В ОДВ симетричною відносно осі форми (Рис. 1.3 , в) практично існують дві окремі моди з поляризацією за двома ортогональними напрямками в площині поперечного перерізу волокна (складові електричного поля орієнтовані в цих напрямках). Моди в цих напрямках поляризації позначаються  $HE_{11}^x$  та  $HE_{11}^y$  (рис. 1.4). Якщо хвилевідна структура волокна ідеально симетрична, то обидва мода з ортогональною поляризацією мають однакове постійне поширення і не розрізняються. Саме з цієї причини такі волокна називають одномодовими.

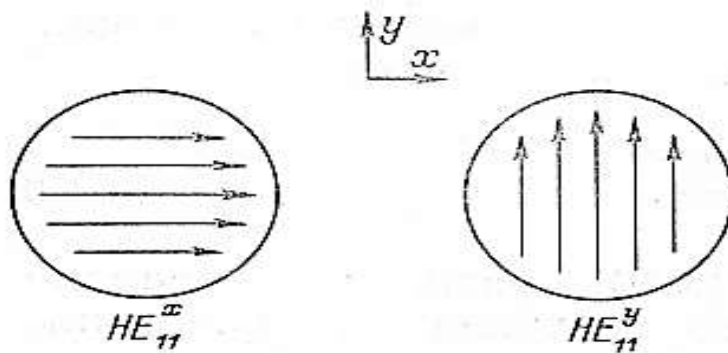


Рис. 1.4. Моди з ортогональною поляризацією в одномодовому оптичному волокні

Однак в реальних оптичних волокнах в наслідок еліптичності та ексцентриситету перетину серцевини виникає осьова асиметрія, при якій, хоча і в незначній мірі, постійні поширення двох ортогональних мод будуть різними. Крім того, на практиці в ОДВ при вигинах волокна і збуреннях через температурних коливань відбувається взаємне перетворення мод  $HE_{11}^x$  та  $HE_{11}^y$  і змінюється поляризації світла. Таким чином, при використанні одномодового оптичного волокна для вимірювань, оснований на інтерференції і поляризації, його вихідний промінь внаслідок збурень, не пов'язаних із самим вимірюванням, відчуває флуктуації, що знижують

точність вимірювання. Щоб вирішити цю проблему, використовують волокно з подвійним променезаломленням. Називають його також волокном з єдиною поляризованої хвилею або волокном зі стійкою поляризацією хвиль.

Подвійне променезаломлення — явище поширення в анізотропному середовищі електромагнітних хвиль з однаковою частотою, але різною довжиною хвилі й швидкістю.

В звичайних ОДВ навіть при введенні світла з лінійною поляризацією виникають зв'язки між модою  $HE_{11}^x$  і модою  $HE_{11}^y$ , зумовлені, як зображено на рис.1.5, флуктуаціями діаметра серцевини уздовж волокна, зовнішніми ушкодженнями. Все це приводить до того, що поляризація світла на виході волокна носить випадковий характер. Якщо флуктуації діаметра серцевини уздовж волокна ( а також и інші зовнішні збурення) мають просторову частоту відповідну різницю постійних поширення обох мод  $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$ , то між модами виникає сильний зв'язок, притому чим більша частота, тим степінь зв'язку вище.

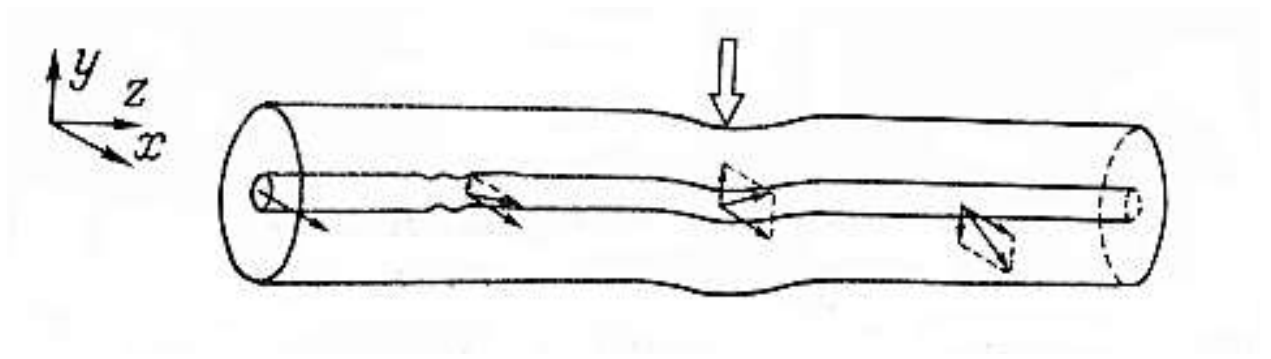


Рис. 1.5. Вплив зовнішніх збурень та зміни хвильовидної структури на кут поляризації

Існують два типи оптичних волокон з подвійним променезаломленням:

- 1) волокно з розподіленням, а точніше, з асиметрією розподілення, коефіцієнта заломлення, що викликає різницю  $\Delta\beta$  (подвійне променезаломлення, обумовлене геометрією)



- 2) волокно напруженого типу, в якому різниця  $\Delta\beta$  виникає внаслідок асиметричного розподілу механічної напруги в серцевині (подвійне променезаломлення, обумовлене механічною напругою).

На рис 1.6 зображені перерізи типових оптичних волокон з подвійним променезаломленням. Волокна на рис 1.6, а, б відносяться до типу з розподілом коефіцієнта заломлення, а на рис. 1.6 в, г – до напруженого типу.

Необхідно відмітити, що в волокнах з розподілом коефіцієнта заломлення виникає також асиметрія напруги серцевини, тобто «чистого» типу волокна з розподілом коефіцієнта заломлення не існує. Основними параметрами оптичних волокон з подвійним променезаломленням є коефіцієнт подвійного променезаломлення мод:

$$B = \Delta\beta/k, \quad (1.12)$$

довжина інтерференційного биття, створюваного модою  $HE_{11}^x$  і модою  $HE_{11}^y$

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{B}, \quad (1.13)$$

та дисперсія моди поляризованої хвилі

$$\tau \approx B/c. \quad (1.14)$$

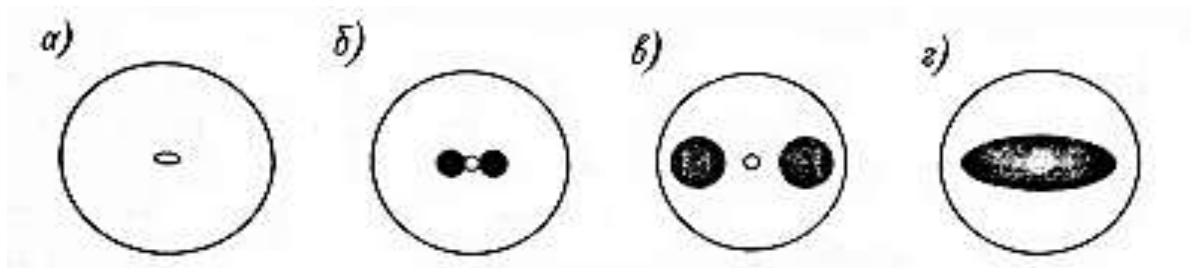


Рис. 1.6. Оптичне волокно з подвійним променезаломленням: а – з еліптичною серцевиною; б – з боковими виїмками або тунелями; в – з збереженням поляризації і заниженим поглинанням (PANDA); г – з еліптичною оболонкою

## 1.2. Типи волоконно-оптичних датчиків.

**Датчики на основі поглинання світла напівпровідником.** На рис. 1.7 наведена структура і пояснюється принцип роботи датчика температури,

робота якого базується на оптичних властивостях напівпровідників типу GaAs і т.д. Напівпровідник має граничну довжину хвилі  $\lambda_g$  спектра оптичного поглинання (мал. 1.7, а) і для світла з коротшою довжиною, ніж  $\lambda_g$ , поглинання збільшується, причому по мірі зростання температури гранична довжина хвилі  $\lambda_g$  зсувається в бік довших хвиль. Якщо напівпровідниковий кристал затиснути між приймальним і передавальним оптичними волокнами (рис.1.7, б) і подати на нього промінь від джерела світла, у якого спектр випромінювання знаходиться в околиці зазначеної границі спектра поглинання, то інтенсивність світла, що проходить через датчик, з підвищенням температури буде падати. Таким чином, по вихідному сигналу фотоприймача датчика можна виміряти температуру.

Структурна схема датчика наведена на рис. 1.7, в. У схемі в якості термочутливого матеріалу використано арсенід галію GaAs, а в якості джерела вимірювального сигналу світлодіод на основі арсеніду галію-алюмінію AlGaAs, а в якості джерела опорного сигналу світлодіод на основі арсеніду-фосфіду індію-галію InGaAsP, причому світлодіоди генерують трохи зміщені у часі імпульси однакової амплітуди. Коли ж вимірювальний імпульс проходить крізь кристал арсеніду галію (термочутливий елемент), його амплітуда зменшується пропорційно зміні температури кристала.

У даному датчику використовують багатомодове оптичне волокно з тефлоновою оболонкою. Подібний датчик знайшов практичне застосування для вимірювання температури проводів лінії електропередачі і температури обмотки високовольного трансформатора в робочому режимі.

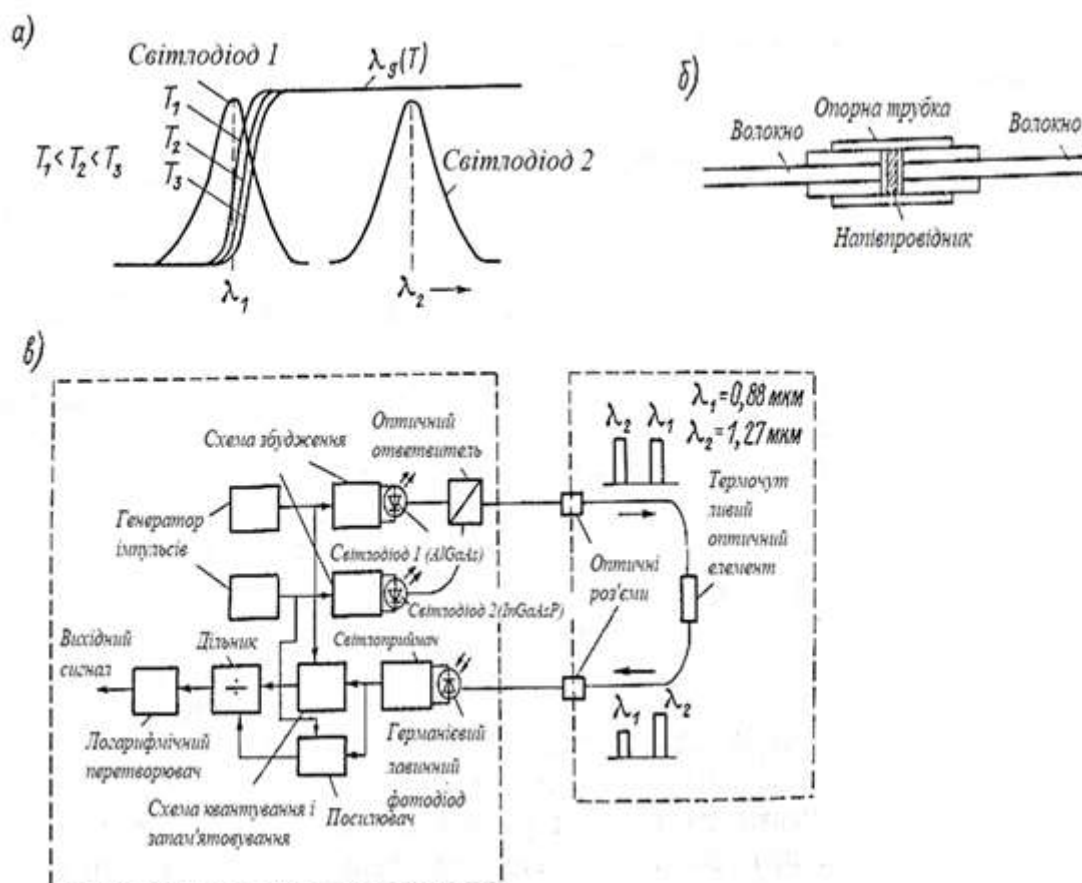


Рис. 1.7. Датчик температури на основі поглинання світла напівпровідником

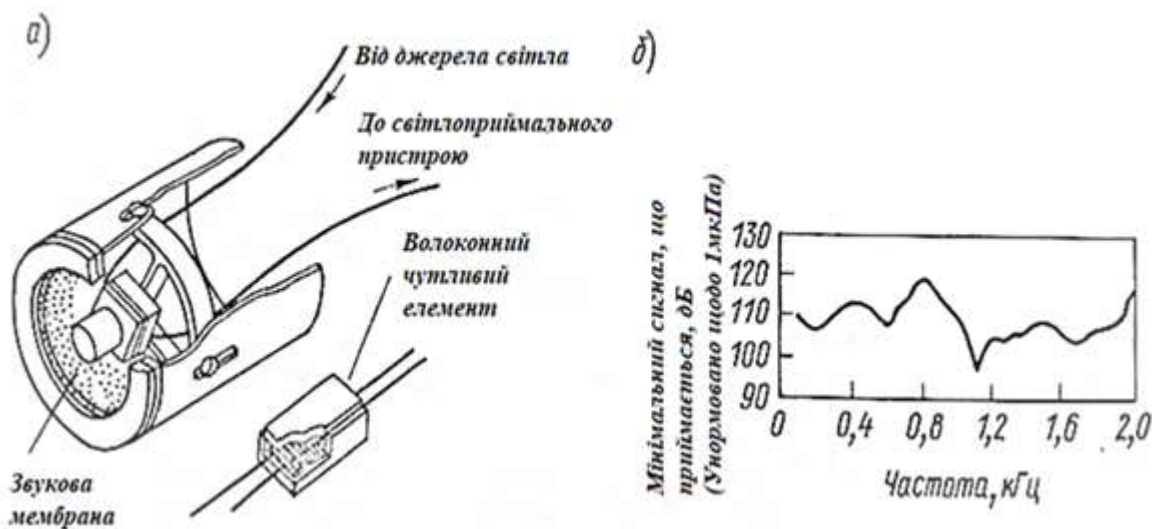


Рис. 1.8. Датчик температури на основі поглинання світла напівпровідником

**Датчики на мікровигинах волокна.** На рис. 1.8, а зображено загальний вигляд датчика акустичних коливань (гідрофона), в якому використовується ефект зміни оптичних втрат – втрат на мікровигинах волокна. Ці втрати виникають внаслідок періодичного вигинання волокна під

впливом зовнішніх факторів. В гідрофоні коливання мембрани під дією звукової хвилі викликають зміну амплітуди вигинів волокна завдяки конструкції волоконно-оптичного роз'єму. На рис. 1.8, б наведена характеристика чутливості, що підтверджує можливість виявлення звукового тиску приблизно 0.1 Па. Однак, при періодичному боковому тиску на волокно і коливаннях його осі між модами з різною постійною розподілу виникає обмін енергією у відповідності з періодом цих коливань. В цьому випадку використовується перетворення мод між каналізованими і випромінюваними світловими хвилями. У результаті встановлено, що багатомодове волокно з квадратичним розподілом коефіцієнта заломлення має підвищену чутливість до втрат на мікровигинах. Крім того, вивчається можливість застосування цього волоконно-оптичного датчика в якості тензометра.

**Інтерферометричні датчики.** На рис. 1.9 представлені основні структури волоконно-оптичних інтерферометрів, зокрема на рис. 1.9, а і б, – структури, особливо важливі для волоконно-оптичних гіроскопів. Вони створюють єдину систему. В інтерферометрах Маха – Цендера для чутливого елемента, інші – для опорного сигналу. На відмінну від них інтерферометри Фабри – Перо і інтерферометри з поляризованими модами виконані лише на одному оптичному волокні і розроблені з урахуванням використання тих чи інших особливостей волокна.

В структурах інтерферометрів, за виключенням інтерферометрів Фабри – Перо, інтенсивність інтерференції  $P_1$  та  $P_2$  при інтенсивності двох або світлових хвиль  $I_1$  та  $I_2$  (на рис 1.9, е це світлові хвилі с ортогональною поляризацією) виражається наступним чином:

$$P_1 \approx I_1 + I_2 + \gamma \cdot 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi, \quad (1.15)$$

$$P_2 \approx I_1 + I_2 - \gamma \cdot 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi, \quad (1.16)$$

де  $\gamma$  – степінь когерентності інтерферуючих хвиль.

Відмітимо, що в попередніх формулах для двох інтерференційних вихідних сигналів  $P_1$  і  $P_2$  знаки при  $\cos \psi$  протилежні. Це точно

дотримується, якщо направлений розгалужувач, об'єднуючий обидва світлових променя, або світлоподільник поляризованих променів не має втрат. Зазвичай світло з інтенсивністю  $I_1 + I_2$  передається за двома оптичними шляхами повністю, що є хорошою ілюстрацією закону збереження енергії.

Різниця фаз  $\psi$  між двома світловими хвилями можна представити у вигляді фази вхідного сигналу  $\psi_s$  і дрейфу  $\psi_d$  в низькочастотній області, викликаного в основному коливанням температури:

$$\psi = \psi_s + \psi_d, \quad (1.17)$$

Звичайно важко усунути вплив коливань температури, тому в якості сигналу, використовуваного в волоконно-оптичному інтерферометричному датчику, приймається тільки змінна складова, розташована вище частотної смуги температурного дрейфу. Зрозуміло, це обмеження неприйнятно при створенні датчика температури і не підходить також для оптичної системи з волокном опорного сигналу. В таких випадках використовується інтерферометр на одному оптичному волокні (рис. 1.9, в і г).

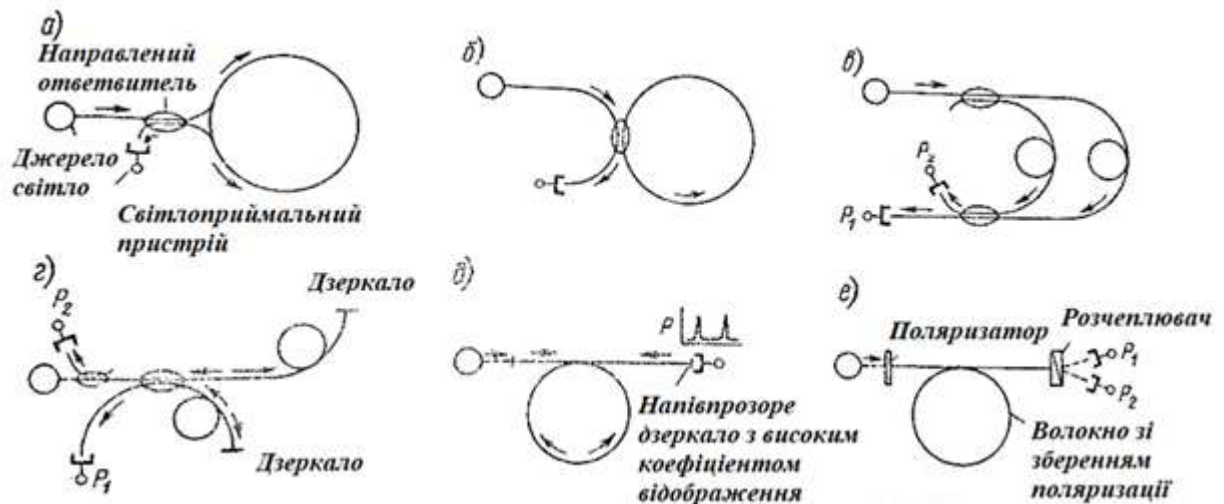


Рис. 1.9. Схеми волоконно-оптичних інтерферометрів:  
а - кільцевого; б - кільцевого Фабрі-Перо; в - Маха-Цендера; г - Майкельсона;  
д - Фабрі-Перо; е - з поляризованими модами

**Бреґґівські датчики.** Оскільки датчик на бреґґівських ґратах є новим, мало дослідженим типом датчиків, який має великі можливості для контролю розподілених параметрів, виберемо його для дослідження та розроблення конструкції вимірювальної системи. Цей датчик може вимірювати декілька фізичних параметрів, але у даній роботі зосередимося на вимірюванні лише напружень у деформованих конструкціях, здійснюваних одночасно у багатьох точках. Прикладами таких конструкцій можуть бути балки у будівельних спорудах, арки та прольоти мостів тощо. Для реалізації таких вимірювань оптичне волокно з множиною бреґґівських ґрат, які мають різний період, закріплюють на конструкції, освітлюють широкосмуговим джерелом випромінювання і реєструють спектри випромінювання, відбитого від кожної окремої ґратки. Чим більше напруження елемента конструкції, тим сильніше розтягується волокно і тим більше зміщення спектра відбитого випромінювання.

Волоконна бреґґівська ґратка являє собою ділянку оптичного волокна, в серцевині якого показник заломлення періодично змінюється в поздовжньому напрямку (рис. 1.10).

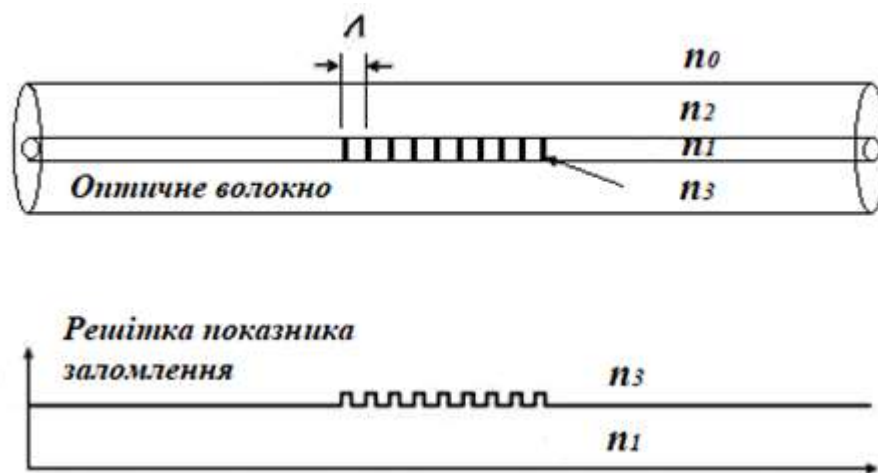


Рис. 1.10. Волоконна бреґґівська ґратка

Випромінювання, що поширюється по оптичному волокну, являє собою комбінацію власних мод світловоду: направляються і випромінювальних. Випромінювальні моди оптичного волокна формують безперервну функцію, а направляються відповідають дискретного набору

постійних поширення  $\beta_i$ . При відсутності змін в показнику заломлення, моди поширюються без взаємодії один з одним. Тому період модуляції показника заломлення вибирається таким чином, щоб забезпечити необхідне резонансна взаємодія між обраними модами світловода. Ця модуляція показника заломлення пов'язує основну моду оптичного волокна з модою, що розповсюджується в зворотному напрямку. В результаті, на дискретній довжині хвилі розповсюджується по оптичному волокну випромінювання відбивається від волоконної брегівської ґратки. Коефіцієнт відбиття залежить від глибини модуляції показника заломлення, а центральна довжина відбитої хвилі визначається умовою Бреґга.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.18)$$

де  $\lambda_B$  - довжина хвилі брегівського резонансу,  $n_{eff}$  - ефективний показник заломлення серцевини волокна для центральної довжини хвилі,  $\Lambda$  - період брегівської ґратки.

Світло, що поширюється в серцевині оптичного волокна, розсіюється кожною граню ґратки показника заломлення. Якщо умови Бреґга не виконуються, то відбите від кожної грані ґратки світло не потрапить в фазі, в кінці кінців, загасає. Для довжин хвиль, які задовольняють умові Бреґга, внески відбитого світла від кожної грані ґратки показника заломлення складаються і поширюються по волокну в зворотному напрямку.

### **Висновок**

Підведемо підсумки першої глави, при огляді літератури можна зробити висновок, що в даний час дослідження в області ВОД інтенсивно розвиваються. Найчастіше вибір ОВ не обмежується вибором ОДВ або БВ. Асортимент оптичних волокон досить різноманітний, і в залежності від досліджуваних об'єктів, найкраще рішення може виявитися використання конкретного типу волокна під необхідну ситуацію. ОВ можна назвати не лише найкращим фізичним середовищем для передачі інформації, а й найбільш перспективним передавачем потоків великого обсягу інформації на

значні відстані. В даній главі були розглянуті основні характеристики оптичних волокон та були проаналізовані класифікації ВОД. Для найбільш успішного використання датчикам бажано мати високі метрологічні характеристики, високу фундаментальність або надійну конструкцію, малу вагу, невеликий розмір і економне енергоспоживання, і одне з найголовніших – датчики повинні бути сумісні з мікроелектронними пристроями при низькій трудомісткості виготовлення і невеликій ціні. Ці вимоги задовольняються волоконно-оптичними датчиками. При розгляді різних типів ВОД, в даній роботі був вибраний датчик на основі бреггівських ґрат, через унікальні характеристики даного типу датчиків.



## 2. АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ ДАТЧИКІВ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ

### 2.1. Спектральні властивості бреггівських ґраток

Розглянемо однорідну ґратку Брегга, сформовану в серцевині одномодового оптичного волокна із середнім показником заломлення  $n_0$ . Профіль показника заломлення може бути виражений як:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right), \quad (2.1)$$

де  $\Delta n$  - амплітуда модуляції показника заломлення бреггівської ґратки,  $\Lambda$  - період бреггівської ґратки,  $x$  - відстань уздовж осі волокна. За допомогою теорії пов'язаних мод висловимо функцію спектра відбиття ґратки Брегга:

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sin^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}, \quad (2.2)$$

де  $R(\lambda, l)$  - коефіцієнт відбиття ґратки як функція від довжини хвилі  $\lambda$  і довжини ґратки  $l$ ,  $\Omega$  - коефіцієнт зв'язку,  $\Delta k = k - \pi/\lambda$  - хвильовий вектор розладу, де  $k = 2\pi n_0/\lambda$  - це постійна поширення і  $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$ . Коефіцієнт зв'язку для синусоїдальної функції модуляції показник заломлення виражається:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda}, \quad (2.3)$$

де  $\eta(V) \approx 1 - 1/V^2$ , ( $V \geq 2,4$ ) - функція, що визначає відсоток інтенсивності основної моди в серцевині волокна.

Для бреггівської довжини хвилі  $\Delta k = 0$ , тому вираз набуває вигляду:

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l), \quad (2.4)$$

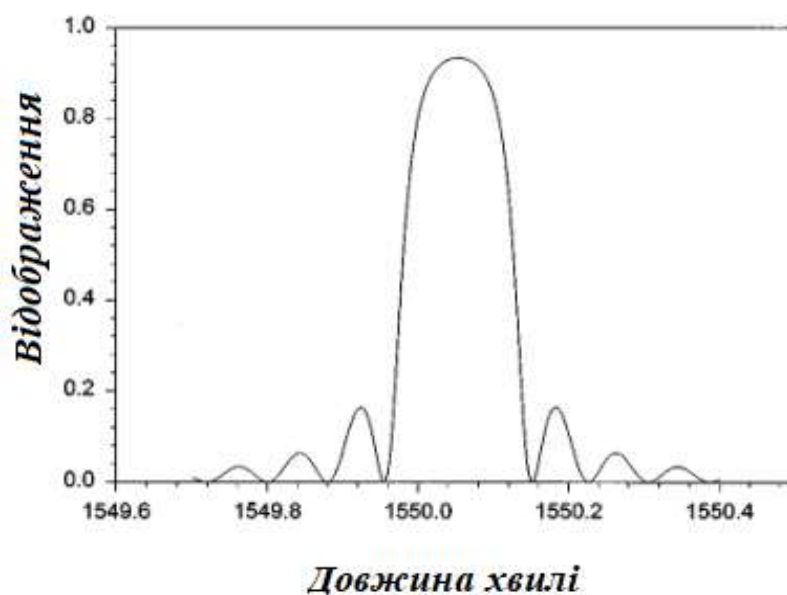


Рис. 2.1. Розрахунковий спектр відбиття волоконної бреггівської ґратки

Коефіцієнт відбиття ВБГ тим більше, чим більше глибина модуляції показника заломлення всередині волоконної ґратки Брегга. З виразу (2.1) видно, що резонансна довжина хвилі ВБГ залежить від ефективного показника заломлення серцевини світловоду і періоду модуляції показника заломлення:

$$\Delta n = \frac{\lambda_B}{\pi \cdot l} \cdot \tanh^{-1}(\sqrt{r_{max}}), \quad (2.5)$$

де,  $r_{max}$  – коефіцієнт відбиття на центральній довжині хвилі бреггівського резонансу ґратки. Так, наприклад, для ВБГ, що має бреггівським резонансом на 1550 нм, з коефіцієнтом відбиття 10% і довжиною ґратки 15 мм, величина наведеної модуляції показника заломлення  $\Delta n$  відповідно до формули (2.5) становить  $1,077 \times 10^{-5}$ . Основний вираз для розрахунку ширини спектра відбиття ВБГ на половині висоти має вигляд

$$\Delta \lambda = \lambda_B \cdot \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2 \cdot n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2}, \quad (2.6)$$

де  $N$  – число періодів ґратки. Параметр  $\alpha$  приймається рівним 1 для сильно-відбивних ґрат (ВБГ з відбиттям близько 100%), в той час як для слабких відбивних ґрат  $\alpha \approx 0,5$ .

Резонансна довжина хвилі волоконної бреггівської ґратки залежить від ефективного ПЗ серцевини світловоду і періоду модуляції ПЗ. У свою чергу ці два параметри залежать від зовнішніх деформуючих напруг і температури. Використовуючи вираз (1.18) зміщення центральної довжини хвилі відбиття під дією деформації і температури можна записати так:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial n} + n \frac{\delta\Lambda}{\delta l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta\Lambda}{\delta T}\right)\Delta T, \quad (2.7)$$

Перший доданок у виразі (2.7) демонструє вплив деформації на волокно. Його фізичний сенс полягає в зміні періоду ґратки та ПЗ, викликаного пружнооптичним ефектом. Цей ефект можна описати таким виразом:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B0}(1 - p_e)\varepsilon(z), \quad (2.8)$$

де  $p_e$  - ефективна пружнооптична постійна, що визначається як:

$$p_e = \frac{n^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (2.9)$$

де  $p_{11}$  і  $p_{12}$  - компоненти пружнооптичного тензора,  $n$  - ПЗ серцевини, а  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона. Для стандартного одномодового ОВ з параметрами  $p_{11} = 0,113$ ,  $p_{12} = 0,252$ ,  $\nu = 0,16$  і  $n = 1,482$  при довжині хвилі відбиття ВБГ  $\lambda_{B0} \approx 1550$  нм розрахункова чутливість до деформації становить 1,2 пм при відносному подовженні  $\varepsilon(z) = 10^{-6}$ .

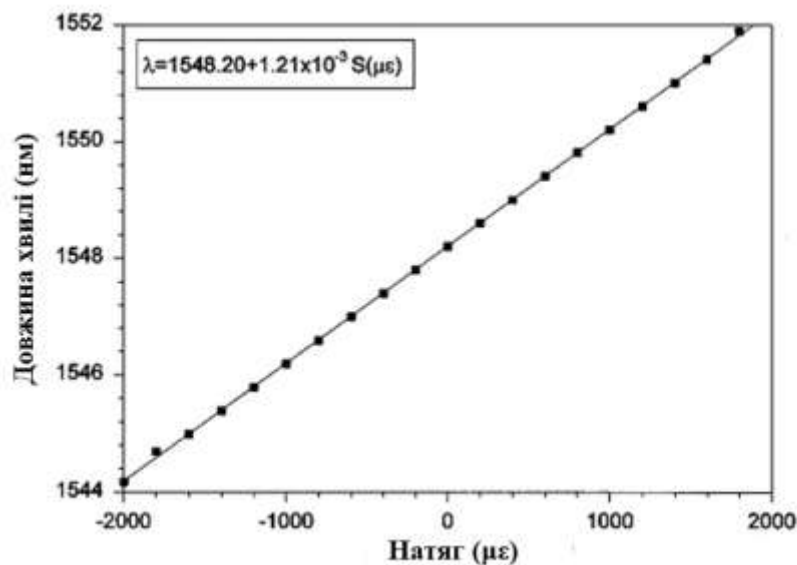


Рис. 2.2. Залежність зміщення бреггівської довжини хвилі від прикладеної деформації

Експериментальні результати дослідження зсуву бреггівської довжини хвилі відбиття від деформації (розтягування/стиснення) представлені на Рис. 2.2.

Другий доданок у виразі (2.7) показує температурний вплив на бреггівські ґратки. Зсув бреггівської довжини хвилі відбувається через температурне розширення кварцу, що викликає зміна періоду ґратки, а також зміни ПЗ волокна. Подібне зміщення  $\lambda_B$  при зміні температури  $\Delta T$  може бути записано як:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (2.10)$$

де  $\alpha = (1/\Lambda) (\delta\Lambda/\delta T)$  - коефіцієнт термічного розширення (для кварцу  $\alpha = 0,55 \times 10^{-6}$ ),  $\xi = (1/n) (\delta n/\delta T)$  - термооптичний коефіцієнт (для волокон з добавками германію приблизно рівний  $8,6 \times 10^{-6}$ ). Видно, що зміна ПЗ є домінуючим ефектом. З рівняння (2.10) можна розрахувати, що температурний зсув ґратки Брегга в одномодовому оптичному волокні становить  $\sim 13,7$  пм/°C. На рис 2.2. показана температурна залежність резонансної довжини хвилі волоконної бреггівської ґратки:

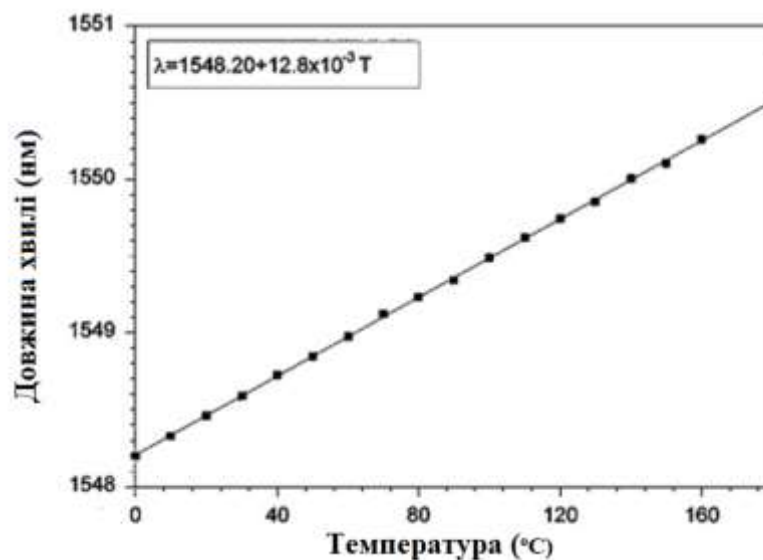


Рис. 2.2. Залежність довжини хвилі резонансу ВБГ від температури

Існує безліч різних способів побудови сенсорних систем на основі бреггівських ґраток. У найпростішому випадку сенсорна система являє собою точковий датчик, з'єднаний через оптичний розгалужувач з джерелом світлового сигналу і блоком аналізатора (рис. 2.3.). Сигнал від джерела відбивається чутливим елементом. Довжина хвилі відбиття фіксується

блоком аналізатора.

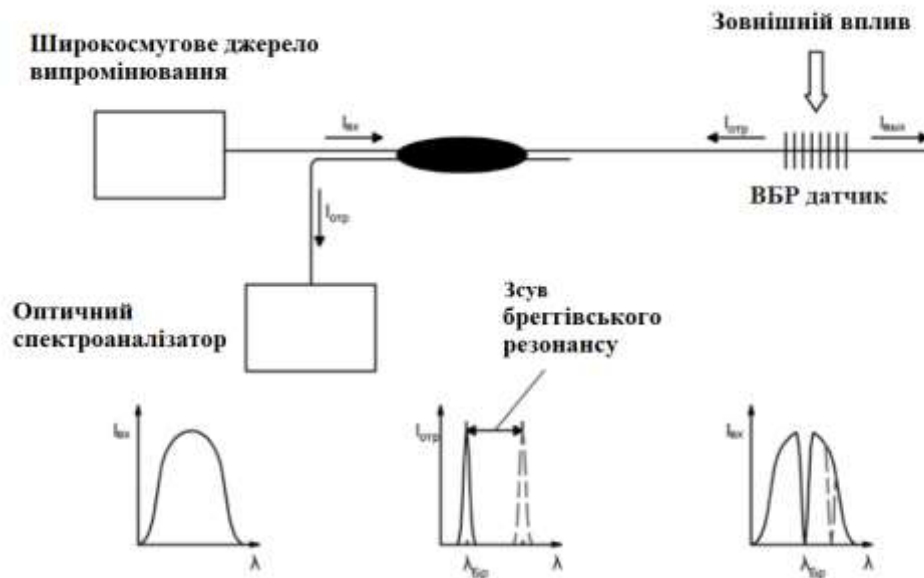


Рис. 2.3. Схема найпростішого волоконно-оптичного датчика на бреггівських ґратах

Як правило, аналізатор (Bragg grating interrogator) являє собою вузькосмуговий спектрометр. Існують спектрометри різних типів: від стандартних дифракційних, де в якості дисперсійного елемента використовується дифракційна ґратка, до аналізаторів на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

Одним з основоположних переваг волоконно-оптичних датчиків є їх відносно легка можливість об'єднання в масиви (мультиплексування). Найчастіше в волоконних датчиках на бреггівських ґратах використовуються два види мультиплексування - мультиплексування по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing - WDM) і мультиплексування за часом (Time Division Multiplexing TDM). Мультиплексування за часом TDM засноване на аналізі швидкості проходження сигналу по системі. Кожен датчик розділений ділянкою волоконного світловода, для проходження якого сигналу потрібен певний, і відоме заздалегідь, час. Джерело посилає короткий імпульс в систему. Сигнал на виході являє собою ряд імпульсів, диференційованих за часом, кожен з яких несе інформацію про стан кожного сенсора окремо. У чистому вигляді така система мультиплексування рідко використовується для об'єднання бреггівських волоконних датчиків, проте як складова частина

більш складної системи зустрічається досить часто.

Принцип WDM мультиплексування ґрунтується на тому, що кожен сенсорний елемент записується зі своїм унікальним періодом ґратки, що дозволяє розрізняти їх по спектру при аналізі і, відповідно, фіксувати показання кожного сенсора окремо. Кількість сенсорів в масиві, в основному, обмежується спектральної шириною джерела і динамічним діапазоном аналізатора.

## **2.2. Волоконна бреггівська ґратка як чутливий елемент**

У фазових інтерферометричних датчиках (ФІД) на основі масивів ВБГ чутливим елементом виступає саме ОВ, що веде до значного зниження собівартості. Відрізок ОВ між двома ґратками є інтерферометр Фабрі-Перо. Під впливом деформації і акустичних коливань змінюється різниця фаз сигналів від двох сусідніх бреггівських ґраток. Інтерферометричні датчики мають найбільшу чутливістю до зміни довжини відрізка волокна під впливом зовнішніх чинників. Принцип дії розподілених волоконно-оптичних вимірювальних комплексів на основі ФІД в найпростішому випадку (у разі одного ФІД) (Рис. 2.4.) і полягає в наступному. Кожна з ґраток Брегга РБ1 і РБ2 датчика відображає імпульс, що надходить на неї від імпульсного лазера, на одній і тій же довжині хвилі Брегга. При цьому тимчасова затримка між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика - волокні, укладеному між ґратками.

Відбиті імпульси надходять в компенсуючий інтерферометр (КІ), який, в свою чергу, також роздвоює кожен з них. затримка, вноситься в поширення імпульсів плечем 2 КІ по відношенню до плеча 1, забезпечує перекриття в часі імпульсу, відбитого від ґратки РБ1, на виході плеча 2 і імпульсу, відбитого від ґратки РБ2, на виході плеча 1 і зсув їх по фазі на  $\varphi_0 = \pi/2$ .

Зміна в часі деформації чутливого елемента датчика в результаті зовнішнього впливу викликають зміна різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Останнє перетворюється фотоприймачем (ФП) в зміну величини струму. Додатковий

зсув фаз  $\varphi_0 = \pi/2$  між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотодетектора на ділянці максимальної крутизни, а рівність інтенсивностей інтерферуючих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

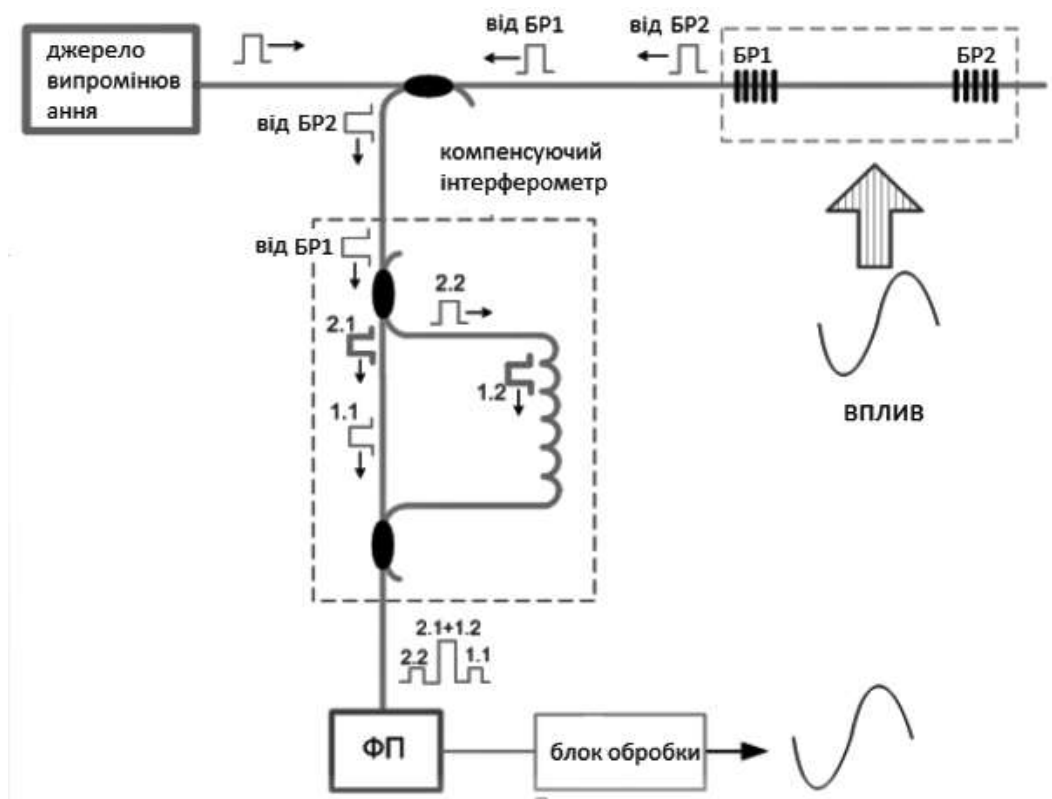


Рис. 2.4. Принцип дії волоконно-оптичної системи вібро-акустичного моніторингу на основі бреггівських ґраток

Для створення масиву датчиків на одному волокні використовується тимчасове (якщо ВБГ мають однакову довжину хвилі відбиття) і спектральне ущільнення (поодинокі датчики складаються з ВБГ що працюють на різних довжинах хвиль відбиття). Використання волоконних ґраток Брегга для формування ФІД дозволяє об'єднувати в одному кабелі велику кількість сенсорів, розрізняючи сигнали від окремих гідрофонів по довжині хвилі і тимчасовій затримці.

### 2.3. Джерело випромінювання для бреггівського датчика

Для волоконно-оптичного датчика на бреггівських ґратах потрібне джерело випромінювання з досить широким спектром і значною потужністю.

Таким джерелом випромінювання в оптоелектроніці є напівпровідниковий світлодіод.

Світлодіод (LED) - це напівпровідниковий прилад, що перетворює електричний струм в світлове випромінювання. Довжина хвилі випромінювання (різний колір) та характеристики якого, залежать від матеріалу з якого виготовлений світлодіод. Чим більш «синій» світлодіод, тим буде вища енергія квантів, а отже, тим більше і ширина забороненої зони.

Світлодіод випромінює світло, при умові, щодо нього прикладена напруга в прямому напрямку: до анода - плюс, а до катода - мінус. Мінімальна напруга, при якому світлодіод починає світлове випромінювання, залежить від матеріалу з якого виготовлен світлодіод. У таблиці.1. нижче приведені значення напруг світлодіодів при струмі 20 мА.

Таблиця 1.

Колір світлодіодів	Матеріал світлодіодів	Гранична довжина хвилі, нм	Пряма напруга при струмі 20 мА	
			Типові значення, В	Діапазон, В
	GaAs, GaAlAs	870 - 940	1.2	1.1 - 1.6
Червоний	GaAsP, GaP, AlInGaP	610 - 640	2.0	1.5 - 2.6
Помаранчевий	GaAsP, GaP, AlGaInP	600 - 630	2.0	1.7 - 2.8
Жовтий	GaAsP, AlGaInP, GaP	580 - 600	2.0	1.7 - 2.5
Зелений	GaP, InGaN	500 - 560	2.2	1.7 - 4.0
Блакитний	ZnSe, InGaN	460 - 470	3.6	3.2 - 4.5
Білий	Синій/УФ діод з люмінофором	Широкий спектр	3.6	2.7 - 4.3

З таблиці 1. Видно, що найбільшу напругу потребують блакитні і білі світлодіоди, а найменшу інфрачервоні і червоні. Випромінювання інфрачервоного світлодіода не помітно людським оком, тому такі світлодіоди не використовують як індикаторів. Вони найчастіше використовуються в різних датчиках, підсвітках відеокамер тощо.



Вольт-амперна характеристика світлодіода характеризує взаємозв'язок між напругою і струмом світлодіода. залежності від типу переходу і умов рекомбінації носіїв форма кривих  $I = f(U)$  може бути різною.

Для переходів з ділянкою об'ємного заряду  $W$ , тонкою у порівнянні з дифузійною довжиною  $L$ , генерацією і рекомбінацією носіїв у цій ділянці можна знехтувати, і рівняння вольт-амперної характеристики має звичайний вигляд:

$$I = I_0 \exp \left[ \left( \frac{eU}{kT} \right) - 1 \right], \quad (2.10)$$

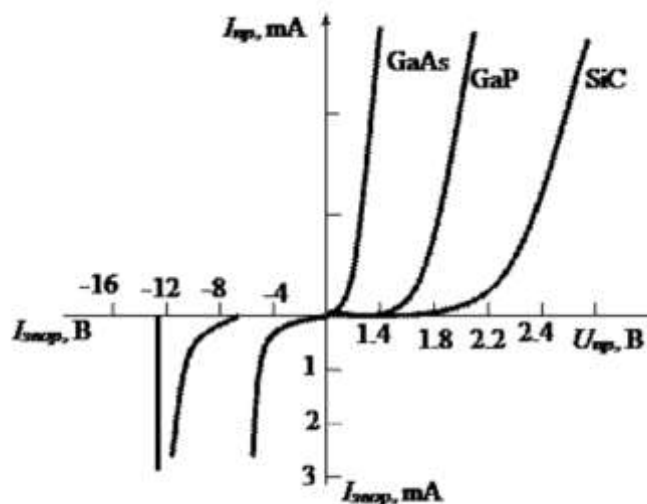


Рис. 2.5. Вольт-амперна характеристика різних світлодіодів

Відмінності в прямих вітках вольт-амперних характеристик світлодіодів пов'язані з різницею ширини забороненої зони напівпровідникових матеріалів (Рис. 2.5). Чим менша довжина хвилі випромінювання, тим більший спад напруги на випромінюючому діоді й втрати електричної енергії в ньому. Зворотні вітки ВАХ мають малу допустиму напругу, так як ширина p-n-переходу у випромінюючих діодах незначна. При роботі в схемах з великими зворотними напругами послідовно з випромінюючим необхідно увімкнути звичайний діод, який має достатнє значення допустимої зворотної напруги.

Спектр випромінювання світлодіода визначається шириною забороненої зони використовуваного напівпровідникових матеріалу, типом

легируючих домішок, рівнем легування і механізмом випромінювальної рекомбінації. Основними матеріалами для виготовлення ефективних світлодіодів є бінарні напівпровідникові сполуки  $A^{III}B^V$  і їх тверді розчини. На рис. 2.3 в відносних одиницях представлені спектри випромінювання при кімнатній температурі деяких світлодіодів, що випускаються промисловістю.

Найбільшою ефективністю володіють світлодіоди на основі арсеніду галію GaAs з шириною забороненої зони  $\Delta E = 1,45 \text{ eV}$ . Отже, максимум спектральної характеристики випромінювання власне GaAs спостерігається на довжині хвилі  $\lambda_{\max} = 1,24 / 1,4 = 0,9 \text{ мкм}$ , що відповідає інфрачервоної області. При легуванні GaAs різними домішками (телур, селен, літій і ін.), Що мають різні глибини залягання в забороненій зоні, світлодіоди можуть випромінювати в діапазоні  $\lambda_{\max} = 0,9 \dots 0,96 \text{ мкм}$ . Світлодіоди на GaAs мають найбільш високу квантову ефективність ( $\eta_{\text{зов}} = 10 \dots 30\%$  в залежності від конструкції). Важливо, що спектр випромінювання GaAs-світлодіодів дуже добре відповідає спектру фоточутливості найбільш поширених Si-фотодіодів.

Фосфід галію (GaP) має ширину забороненої зони  $\Delta E = 2,25 \text{ eV}$ , що визначає довжину хвилі випромінювання  $\lambda_{\max} = 0,56 \text{ мкм}$ . Це відповідає зеленому кольору світіння. При легуванні домішками (N, O<sub>2</sub>, Zn) такі світлодіоди можуть випромінювати червоний, жовтий, зелений світло. Таким чином, GaP світлодіоди призначені для роботи у видимій частині спектру. Для GaP -  $\eta_{\text{зов}} = 7 \dots 0,7\%$ .

Світловипромінюючі діоди на короткохвильову область видимого спектру, що працюють в блакитному, синьому і фіолетовому діапазонах, можуть бути створені на основі нітриду галію GaN і гетеропереходів з використанням твердих розчинів  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$  і  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ . Світлодіоди на основі GaN дають випромінювання  $\lambda_{\max} = 0,44 \text{ мкм}$ , але з дуже низькою ефективністю  $\eta_{\text{зов}} = 0,5\%$ .

Для цієї ж мети застосовують карбід кремнію SiC. Хоча діоди на основі SiC мають малий  $\eta_{\text{зов}} = 0,01\%$ , але мають високу тимчасову і температурну стабільністю. На їх основі створюють еталонні джерела випромінювання.

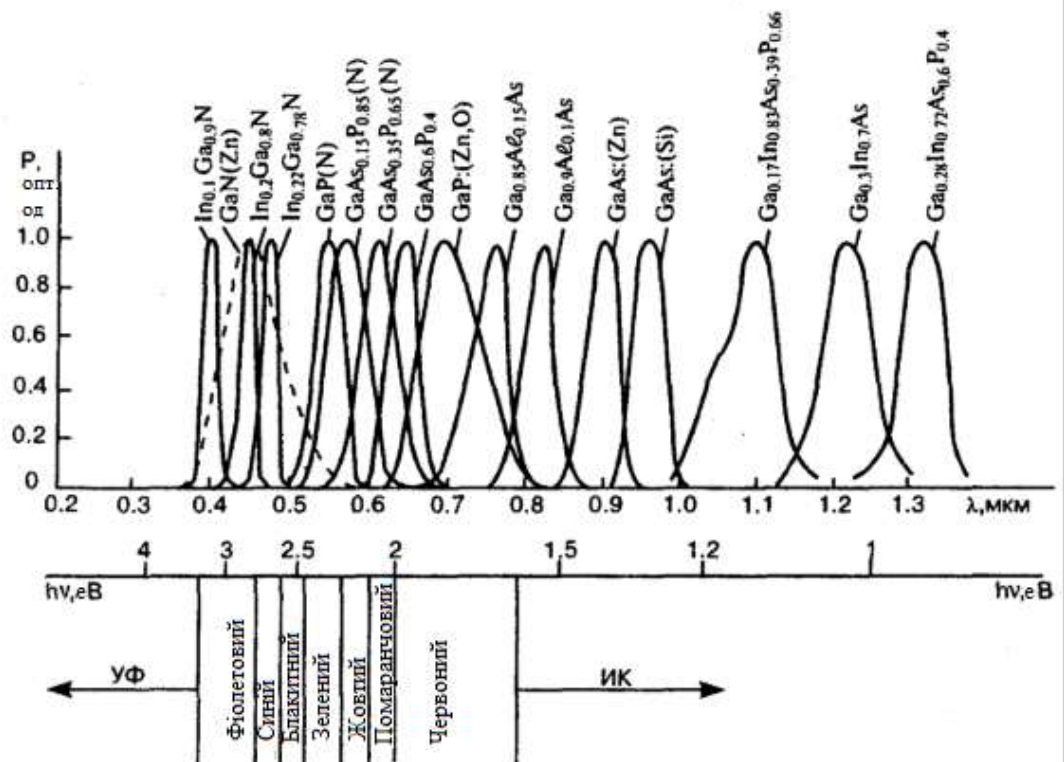


Рис. 2.6. Спектри випромінювання світлодіодів.

Для випромінюючих діодів як інфрачервоного, так і видимого випромінювання широко застосовують потрібні з'єднання, виготовлені на основі твердого розчину галій-алюміній-миш'як GaAlAs. Застосовують також тверді розчини на основі галій-миш'як-фосфор GaAsP і індій-галій-фосфор InGaP. За узагальненим показником ( $P_{\text{изл}}$ , швидкодія) GaAlAs найбільш повно задовольняє вимогам оптоелектроніки. У цьому матеріалі частина атомів Ga в кристалі GaAs заміщається атомами Al. У міру збільшення частки заміщених атомів ширина забороненої зони змінюється від  $\Delta E = 1,45$  eV (GaAs) до  $\Delta E = 2,16$  eV (чистий AlAs). Таким чином, такі світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі  $\lambda_{\text{max}} = 0,6 \dots 0,9$  мкм, тобто генерувати випромінювання як у видимій, так і інфрачервоної області спектра. Зовнішній квантовий вихід для цього матеріалу становить  $\eta_{\text{зов}} = 1,2 \dots 12\%$ .

## **2.4. Цифрова камера бреггівського датчика**

Цифрова камера на сьогоднішній день являється незамінним елементом в навчальних, наукових, клінічних або промислових лабораторіях. Цей пристрій з кожним роком отримує більш широке застосування, за допомогою постійного розвитку нових технологій та функцій, починаючи від можливості зафіксувати спостережуваний зразок і закінчуючи точним відтворенням мікрооб'єктів в тривимірній графіці. Не дивлячись на широкий спектр своїх можливостей, дослідники, що працюють зі складними завданнями, часто зустрічаються з проблемою реєстрації слабких сигналів або динамічних процесів, з чим sCMOS-камера нового покоління безперечно лідирує.

На сьогодні до sCMOS-камери ринок фототехніки в основному займали пристрої, що використовують матрицю CMOS і пристрої, що використовують матрицю CCD.

Матриця CCD – мікросхема на кремнієвій основі яка складається з світлочутливих фотодіодів, що використовує технологію ПЗЗ – приладів із зарядовим зв'язком. Продуктивність CCD-матриці полягає в ефективності реєстрації світла та зменшенні шуму, як від слабого сигналу, так і від підсилювача зчитування. Однак, одним з основних недоліків ПЗЗ-матриці полягає в тому, що матриця являє собою пристрій послідовного зчитування, дозволяючи при цьому отримувати низькі шуми за рахунок повільної швидкості зчитування. Але, коли є необхідність отримати більш високу швидкість кадрів, зменшується роздільна здатність і знижується динамічний діапазон або збільшується шум зчитування.

Матриця CMOS – мікросхема на основі польових транзисторів з ізольованим затвором з каналами різної провідності, вони можуть досягти високу частоту кадрів з середньою чутливістю. У CMOS-матриці кожен окремий піксель має підсилювач, пов'язаний з ним. Ряд пікселів може зчитуватися паралельно рядку, вибравши адресу регістру або окремий піксель за допомогою мультиплексора стовпчика. CMOS-матриця по суті є

пристроєм паралельного зчитування і, отже, дозволяє досягти більш високих швидкостей зчитування, що особливо актуально для обробки зображень.

Передова технологія sCMOS (scientific CMOS) є новим поколінням CMOS матриці і спеціально розроблена для візуалізації та кількісного аналізу зображень в наукових дослідженнях. sCMOS матриці мають більш низький рівень шумів і більш високу квантової ефективності в порівнянні з CMOS. Адже це гібридна матриця, яка поєднують в собі CCD і CMOS - технології, забезпечуючи високу продуктивність, перевершує традиційні CCD і CMOS - детектори. CCD і CMOS-пристрої були розроблені для того, щоб відповідати характеристикам зображення, одержуваного за допомогою CCD -матриць з можливостями швидкості зчитування CMOS-матриць.

Матриця має роздвоєну схему зчитування, в якій верхня і нижня половинки матриці зчитуються незалежно один від одного. Кожен стовпець у кожній половині сенсора оснащений двома підсилювачами і двома аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), як зображено на Рис. 2.7. Пара, що складається з двох підсилювачів і двох АЦП, має незалежні настройки посилення. Таким чином, остаточне зображення відновлюється шляхом комбінування зчитування пікселя з обох каналів, з каналу високого і низького коефіцієнта посилення зчитування для досягнення широкого динамічного діапазону всерединікадру для маленького кроку пікселя. Кожен піксель має 5 транзисторів (дизайн "5T>"), дозволяючи використовувати режим " кадрового затвора ", виробляти подвійну корельовану вибірку (для зменшення шуму) і горизонтальний анти-блюмінг (для зменшення засвічення).

Технологія sCMOS заснована на новому поколінні дизайну і технології КМОП-процесу. Сенсор sCMOS-матриці з роздільною здатністю 5,5 Мп має велике поле зору і високу роздільну здатність, ставлячи під загрозу шум зчитування або частоту кадрів. Значення рівня шуму зчитування незначно, навіть у порівнянні з самими високопродуктивними CCD-матрицями. Навіть CCD-матриці з повільним скануванням не здатні досягти такого низького рівня шуму. Той факт, що sCMOS сенсор досягає значення

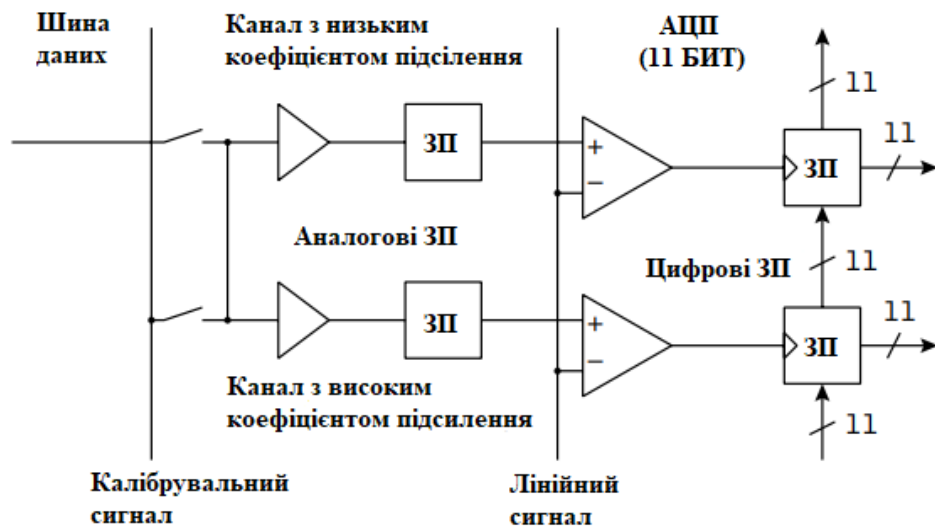


Рис. 2.7. Структура CMOS-камери

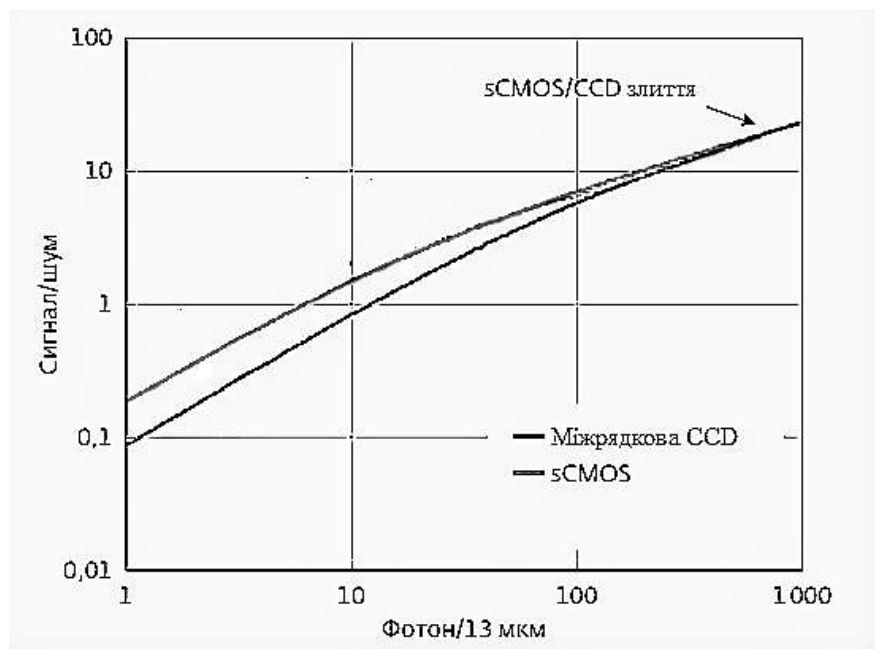


Рис.2.8 Порівняння співвідношення сигнал-шум для наукових камер Andor: sCMOS-матриці, міжрядкової CCD-матриці.

середньоквадратичного шуму зчитування в 1 е-електрон при зчитуванні 5,5 Мп зображення зі швидкістю 30 кадрів/с робить його справді унікальним на ринку. Крім того, сенсор здатний досягати 100 повних кадрів в секунду зі середньоквадратичним шумом зчитування в 1.3 е-електрон. Для порівняння, найнижче значення рівня шуму рядкової CCD-камери при зчитуванні зображення розміром 1,4 Мп при швидкості 16 кадрів/с становить приблизно 10 е-. Можна отримати велику швидкість кадрів за допомогою вибору певної області, так що при зміні поля зору досягається висока роздільна здатність.

## **Висновок**

В даній главі проаналізовані елементи датчика на основі бреггівських ґрат, розглянуті: світлодіод, чутливий елемент, цифрова камера та їх характеристики. В якості чутливого елемента була вибрана волоконна бреггівська ґратка. Через те, що ВБГ представляє з себе селектуюче дзеркало, при випроміненні в оптоволокно від широкосмугового, такого, як світлодіод, джерела, світло відбивається з вузькою спектральної смугою з центром на довжині хвилі Бреґґа. Світло, що залишається - продовжує свій рух в оптоволокну без зайвих втрат.

Світлодіоди знаходять широке застосування як кероване джерело живлення. У порівнянні з іншими джерелами світла світлодіоди мають велику кількість переваг: висока світлова віддача, механічна міцність, широкий спектр світла, світлодіоди - екологічно чистий продукт, мають малу вагу, невеликий розмір, невелику енерговитратність, довговічність і т.д.

За допомогою цифрової камери є можливість зафіксувати виміряні параметри на екрані комп'ютера, камера є дуже важливим елементом, тому необхідно підійти до цього питання серйозно. При виборі цифрової камери необхідно звернути увагу на такі параметри, як: низький рівень шумів, висока швидкість зчитування, енерговитратність, компактність, невелика ціна, саме тому я рекомендую використовувати цифрову камеру нового покоління sCMOS.

### **3. ДАТЧИК З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ**

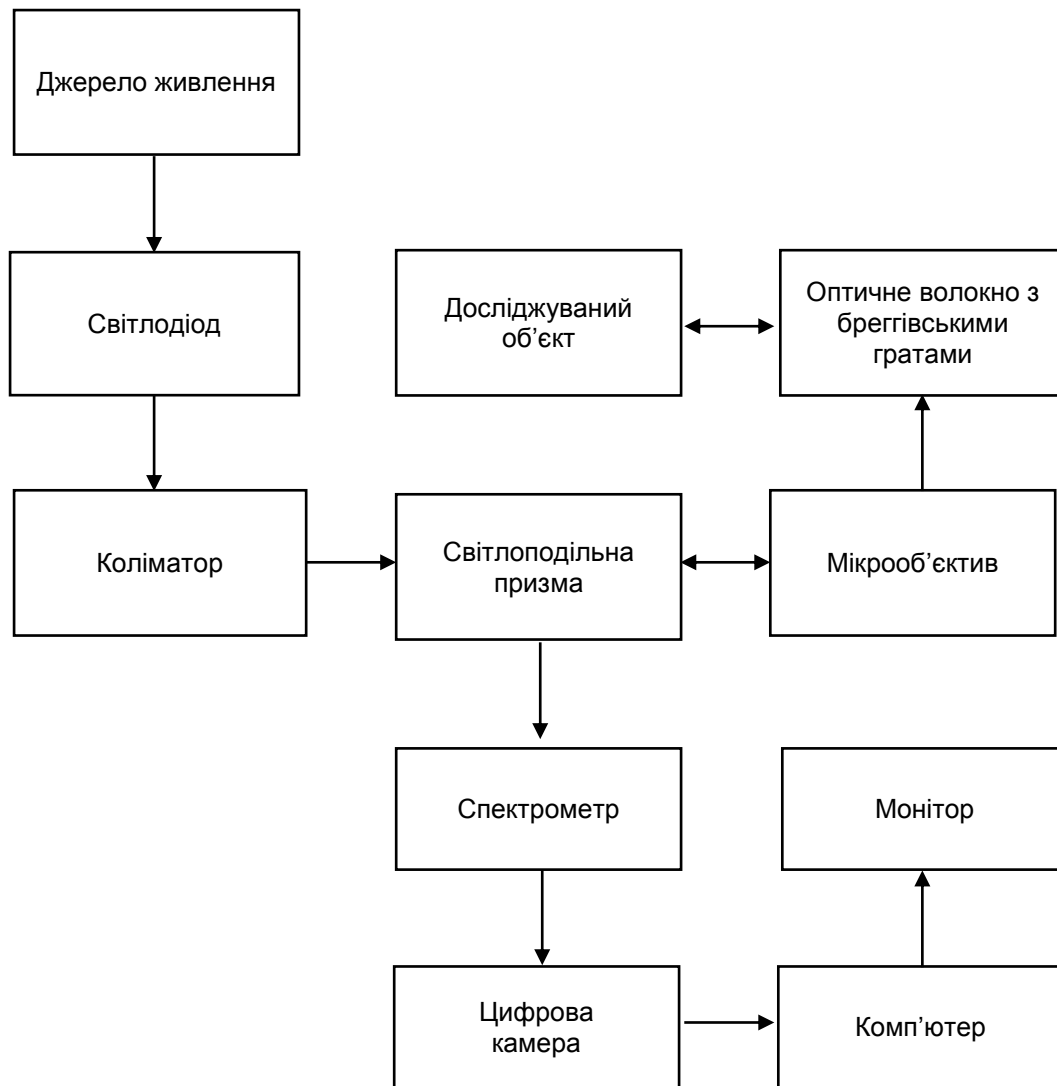
#### **3.1. Структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами**

На рис. 3.1 зображена структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами. Джерелом випромінювання в схемі є світлодіод, який збуджується джерелом живлення. Випромінювання світлодіода спрямовується на коліматор, який формує паралельний пучок світла. Цей пучок потрапляє на світлоподільну призму та мікрооб'єктив, який вводить випромінювання в оптичне волокно з бреггівськими ґратками. Волокно жорстко зв'язане з досліджуваним об'єктом, так що деформація об'єкта призводить до розтягування або стискання волокна. Випромінювання, відбите від бреггівських ґраток волокна, повертається через мікрооб'єктив на світлоподільну і спрямовується на спектрометр. Спектрометр формує зображення спектральної лінії бреггівського розсіяння за допомогою цифрової камери та комп'ютера на екрані монітора.

За допомогою спеціалізованої програми комп'ютер розраховує величину теплової або механічної деформації волокна і зв'язує цю величину з тепловим або механічним впливом на досліджуваний об'єкт (наприклад, опори моста, балки прольотів інженерних споруд, трубопроводи тощо).

Для надійної роботи бреггівських датчиків відрізки волокна довжиною приблизно 10 см з убудованими ґратами мають бути приклеєні за допомогою епоксидної смоли до контрольованої конструкції. У цих місцях з оптичного волокна потрібно зняти захисну полімерну оболонку.





3.1. Структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами

### 3.2. Вибір джерела випромінювання для датчика з розподіленими параметрами

Для забезпечення нормальної роботи датчика з розподіленими параметрами джерело випромінювання має перекривати своїм спектром спектральні діапазони роботи усіх бреггівських ґрат. Найбільш придатним для цього є світлодіод (рис. 3.2).

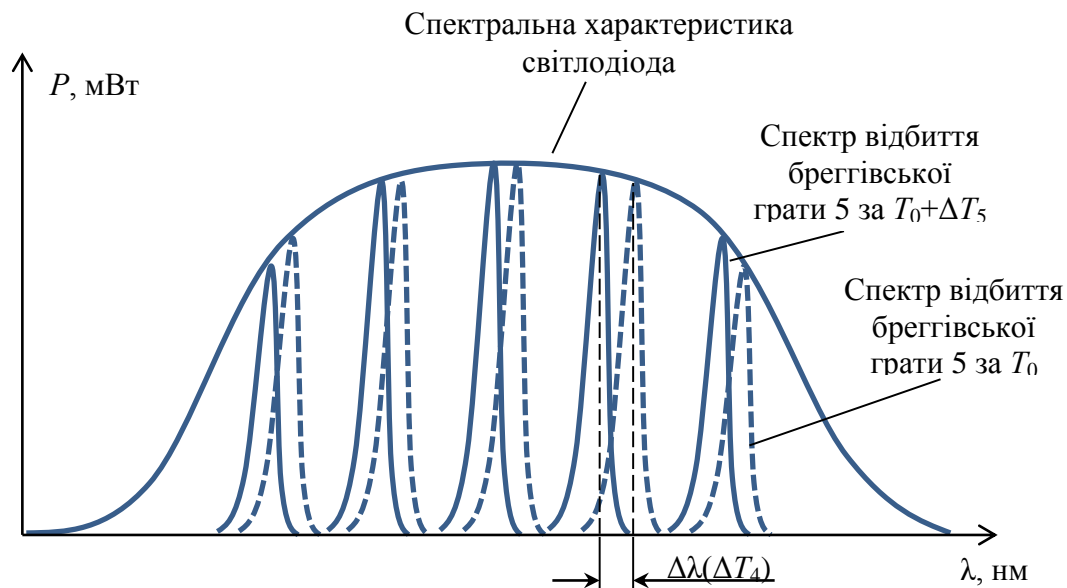


Рис. 3.2. Спектральна характеристика брегівського відбивача з розподіленими параметрами

На рис. 3.3 показана спектральна характеристика світлодіода SFH 4735 німецької фірми OSRAM, який має досить плоску характеристику у діапазоні 650–1050 нм. Такий світлодіод за своєю спектральною характеристикою відповідає поставленим вимогам, але треба враховувати, що така досить велика ширина спектра досягнута за рахунок перетворення короткохвильового (синього) вузькосмугового випромінювання люмінофором у більш довгохвильове широкосмугове випромінювання. Це ускладнює введення випромінювання у волокно, оскільки люмінофор не є точковим джерелом світла (світлодіод наближається до нього). Випромінювання точкового джерела простіше зібрати (сфокусувати) на торці оптичного волокна.

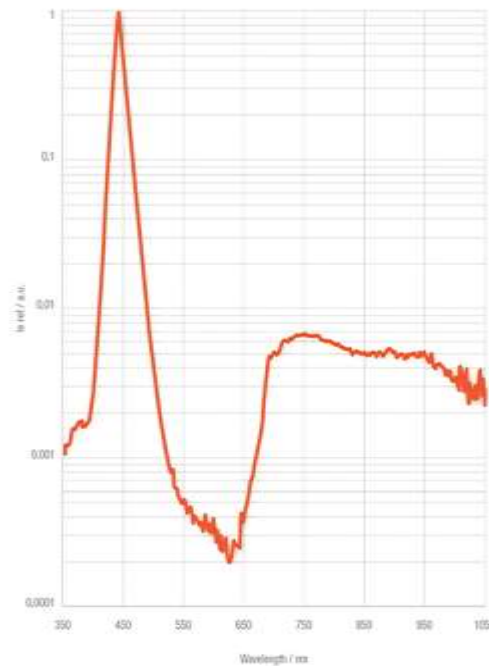


Рис. 3.3. Спектральна характеристика світлодіода SFH 4735

### 3.3. Розрахунок чутливості датчика з розподіленими параметрами

Вхідні дані для розрахунку:

- робочий діапазон температур:  $\Delta T_{sens} = 100 \text{ K}$ ;
- довжина оптичного волокна:  $L = 1000 \text{ м}$ ;
- кількість бреггівських ґраток:  $N = 10$ ;
- показник заломлення серцевини кварцового волокна  $n = 1.48$ ;
- залежність показника заломлення від температури  $dn/dT = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;
- лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла  $\alpha_T = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;
- період бреггівських ґрат  $\Lambda = 0,1 \text{ мм}$ .

Для розрахунку чутливості датчика до температури скористаймося формулою (2.7):

$$\Delta \lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T,$$

звідки чутливість може подана як

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left( \Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT} \right).$$

Приріст періоду ґратки знайдемо як

$$\Delta\Lambda = \alpha_T \Lambda,$$

де  $\alpha_T$  – температурний коефіцієнт показника заломлення кварцового скла, що дозволяє переписати формулу як

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left( \Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{\alpha_T \Lambda}{dT} \right).$$

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \cdot 10^{-4} (1,28 \cdot 10^{-5} + 1,48 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7}) = 2,72 \cdot 10^{-9} \text{ м/К} = 2,72 \text{ нм/К}.$$

Як бачимо, чутливість сенсора пропорційна періоду бреггівських ґрат, але висока чутливість у разі використання множини ґрат не потрібна, тому що спектри бреггівського розсіяння різних ґрат почнуть перекриватися і неможливо буде їх розрізнити.

Зробімо розрахунок необхідної чутливості для  $N = 10$  бреггівських ґрат, розташованих вздовж оптичного волокна. якщо ширина спектра джерела випромінювання становить  $\Delta\lambda_{LED} = 200 \text{ нм}$ , а температурний діапазон роботи сенсора становить  $\Delta T_{sens} = 100 \text{ К}$ . Шукана чутливість може бути знайдена із умови неперекриття спектральних діапазонів розсіяння бреггівських ґрат:

$$\Delta\lambda_{LED} = N S_T \Delta T,$$

звідки

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{LED}}{N \Delta T_{sens}}.$$

Підставляючи числові значення, знайдемо

$$S_T = \frac{200}{10 \cdot 100} = 0,2 \text{ нм/К}.$$

### **Висновок**

В третій главі розглянута структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами. Де джерелом живлення слугує світлодіод.

За основні вхідні дані при розрахунку чутливості волоконно-оптичного датчика були взяті наступні дані, як показник заломлення серцевини кварцового волокна, залежність показника заломлення від температури, лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла.

Чутливість дозволяє використовувати дані вимірювань для наукових цілей. Для покращення чутливості можна збільшити ширину спектра.

При механічному і температурному впливі змінюються період і показник заломлення решітки, внаслідок чого ми спостерігаємо зміщення довжини хвилі відбитого світла. Вимірюючи величину цього зміщення, можна визначити відносну деформацію і зміну температури.

## **4. ТЕХНОЛОГІЯ ДАТЧИКА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ**

### **4.1. Технологія виготовлення одномодового волокна**

Існує сучасна технологія виробництва оптичного волокна: через витяжку зі скляної заготовки, поверхневі шари якої відповідним чином леговані різними оксидами (так звана газова фаза. Заготовки зі скла виготовляються у вигляді циліндричного стержня, з якого витягується оптичне волокно. Профіль стержня являє розширений профіль оптичного волокна. Після інтенсивного локального нагріву, волокно витягають з цієї заготовки. Воно відразу покривається шаром полімеру в кілька мікронів товщиною, так званим первинним покриттям, для механічного захисту.

Ця установка, близько 7 метрів висотою і досить складної конструкції, з точними вимірами і контролем технології з використанням мікро-ЕОМ. Механізм подачі передає заготовку в зону витяжки з піччю опору або пальником. Залишаючи цю зону, волокно вимірюється і значення вимірювань передаються в систему управління. Час відгуку не повинно бути більше, ніж 0.1-0.03 с, а результуючий діаметр відхилення від необхідних значень не повинно перевищувати 2%. Тоді сопло прогріває первинний шар покриття волокна. У разі силіконових смол для загартування використовуються теплові печі, а в разі акрилових - ультрафіолетове світло. Число печей і загальна довжина зони зміцнення залежить від швидкості витяжки. При нанесенні первинного покриття досягається швидкість до 5 м / с. Волокна з первинним покриттям вводяться в машину для витяжки контрольоване системою управління. Швидкість витяжки машина вибирає на основі інформації про діаметр волокна. Останній компонент лінії - пристрій для намотування, після якого іноді ставлять пристрій для перевірки волокна на міцність. Волоконно-витягають лінії можуть містити додаткові пристрої, які спрощують операції витяжки або роблять їх більш точними.

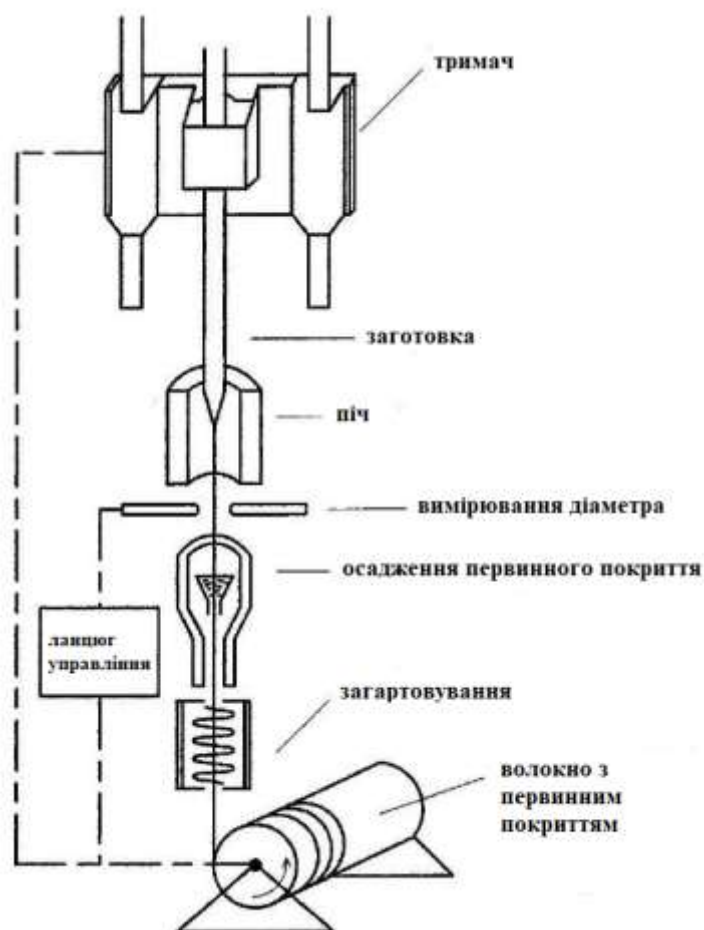
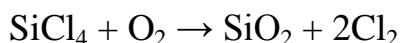


Рис.4.1. Витяжка оптичного волокна із заготовки

Підготовка заготовки (метод газової фази) заснована на окисненні тетрахлорида кремнію:



Можливі інші, подібні, реакції окислення, в ході яких утворюються дуже дрібні частинки твердих оксидів. Ці частинки осідають на поверхні і утворюють пористий шар, який при підвищенні температури плавиться в так званих преформ, з яких оптичне волокно простягається далі. У виробництві преформ використовуються різні технології, які відрізняються або напрямком, в якому реагують компоненти, або механізмом реакції. Підготовка заготовки найбільш важлива операція в усьому процесі виробництва, так як всі властивості волокна задаються властивостями цієї заготовки.

При підготовці заготовки методом хімічного осадження парів (CVD) використовуються наступні технології:

- OVD (Outside Vapour Deposition, Зовнішнє осадження парів), осадження за межами газової фази шляхом бічного осадження на ядро, яке обертається з постійною швидкістю;
- MCVD (Modified Outside Vapour Deposition, Модифіковане зовнішнє осадження парів), належить до внутрішніх методам, в яких оксиди, наносяться на внутрішню стінку обертається кремнієвої трубки;
- PCVD (Plasma Chemical Vapour Deposition, Плазмове хімічне осадження парів), так само, як з MCVD, оксиди, наносяться на внутрішню стінку обертається кремнієвої трубки, але реакція, відповідно до початкового рівнянням, ініціюється мікрохвильової плазмою;
- VAD (Vapour Phase Axial Deposition, Осьове осадження парової фази), відрізняється від попередньої технології тим, що оксиди наносяться на обертову оправку з матеріалу-носія в осьовому напрямку.

**Технологія OVD** – оригінальна технологія компанії Corning Glass Works (яка в 1970 році зробила перші оптичні волокна з загасанням менше 20 дБ/км), використовується компанією у виробництві оптичних волокон. Цей метод використовує бічне осадження на ядро, яке обертається з постійною швидкістю. Як правило, ядро 0.5 см в діаметрі і зроблено з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  або графіту. Паливо,  $\text{SiCl}_4$ , і відповідні домішки подаються в пальник. Гідроліз парів галогенідів в полум'я призводить до появи твердої сажі оксиду або суміші оксидів, частина яких осідає на ядро, формуючи пористе речовина, щільність якого становить близько 1/3 щільності кремнієвого скла. Шари легується на стрижень, після чого формуються в витягнуте волокно. Після легування, стрижень, через різного теплового розширення, акуратно видаляється і пориста структура спікається в печі при температурі близько 1500°C (рис.2). Спалювання паливного газу супроводжується утворенням ОН груп. Під час спікання потік  $\text{He}$ , з кількома відсотками  $\text{Cl}_2$ , ефективно видаляє ОН групи. Цей метод надає високі вимоги до захисту навколишнього середовища від забруднення. Управління технологією OVD також вимагає: необхідність підтримки постійної швидкості потоку сировини і палива, обертання



заготовки і постійну температуру пальника. При склуванні швидкість газу, обертання і температура пальника повинні бути постійними. При склуванні виникають хімічні реакції між домішками та газом, що призводить до зміни профілю показника заломлення. Ці зміни враховуються заздалегідь, тобто так, що після реакції з газом профіль є правильним. З однієї заготовки можна зробити волокно довжиною більше 10 км і діаметром 125 мкм. В даний час досягнуті темпи виробництва вище, ніж 2 г/хв, що відповідає 75 м волокна в хвилину. Досягнуто низькі значення загасання, пропускна здатність досягає 1 ГГц/км.

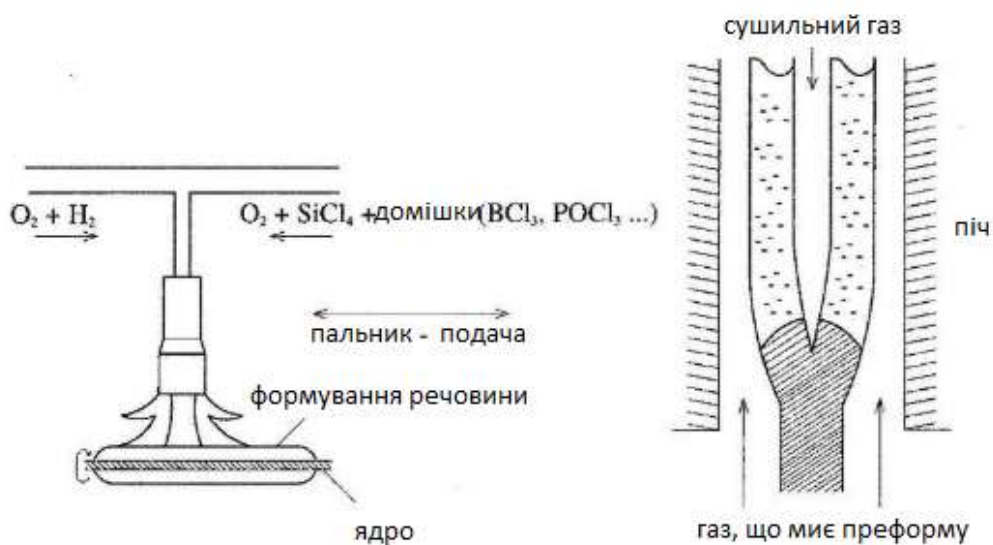


Рис.2. Технологія OVD

**Технологія MCVD** заснована на внутрішньому окисленні газової фази в зоні реакції, всередині обертається трубки з діоксиду кремнію, уздовж якої рухається киснево-водневе полум'я. Ця технологія була розроблена в Bell Laboratories і введена в практику Western Electric Company. Вона поступово поширилася в Японії і Європі, а сьогодні це найбільш часто використовуваний метод. Перевага цього методу полягає у великій чистоті основного процесу, про забруднення навколишнього середовища практично не може бути й мови. Заготовки готуються нагріванням кварцової трубки з шаром спеченої сажі при температурі близько 1900 °C, коли відбувається усадка по формі стрижня. У виробництві використовується швидкість

осадження 0.4 г/хв, що відповідає 40-160 м волокна в хвилину, з можливістю складання волокна, загальною протяжністю від 10 до 15 км(Рис.3).

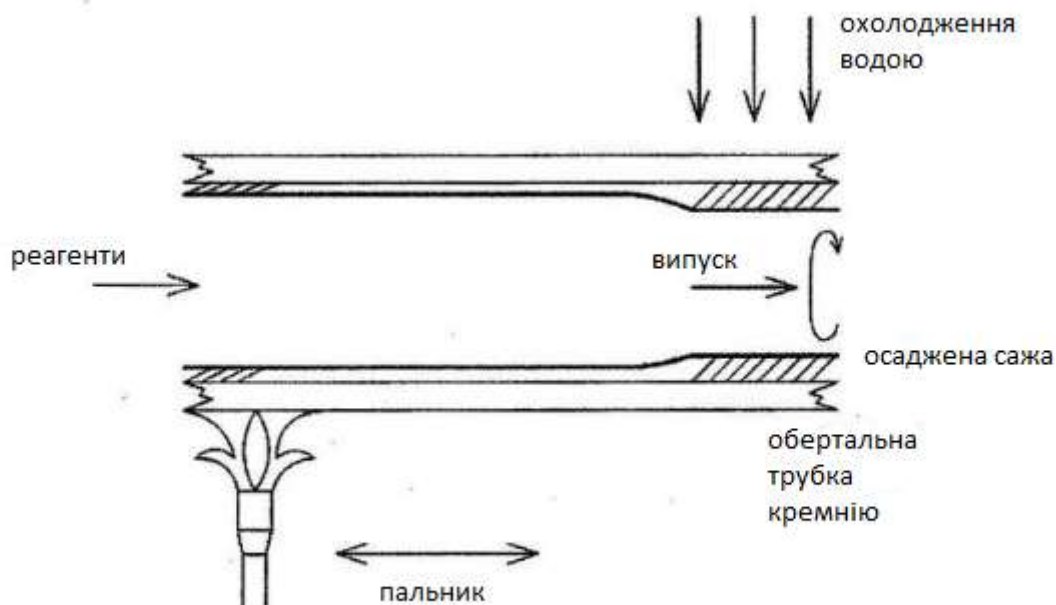


Рис. 4.3. Принцип виробництва методом OVD

Використовуючи заготовки, зроблені за технологією MCVD, можливо виробляти багатомодові і одномодові світловоди зі ступінчастим або градієнтним профілем. Загасання багатомодового волокна - 3 дБ/км на довжині хвилі 850 нм, і 1 дБ/км на 1300 нм, з пропускнуою здатністю в кілька ГГц/км. Пікові значення істотно краще, з загасанням менше 1 дБ/км і пропускнуою спроможністю в десятки ГГц/км. В одномодових волокнах, загасання при 1550 нм нижче 0.2 дБ/км, пропусчна здатність 10 ГГц/км.

**Технологія PCVD** – розроблена в науково-дослідній лабораторії Philips, виробництво почалося в Philips Glass Division. Технологія входить в число внутрішніх методів і характеризується застосуванням неізотермічної плазми, в якій протікає реакція. У трубці підтримується тиск 1330 Па, вона поміщається горизонтально в печі при температурі 1200 °С. У середині печі, СВЧ-генератор, що працює з частотою 2.45 ГГц, рухається навколо трубки зі швидкістю 8 м/хв, уздовж довжини 70 см. Цей генератор виробляє СВЧ плазму, в якій на стінках трубки відбувається гетерогенна реакція, що

проходить без сажі. Для осадження  $\text{SiO}_2$  ефективність становить майже 100%, а для  $\text{GeO}_2$  близько 85%. Описаний метод дає дуже тонкі шари (до 700 шарів близько 0.5 мкм), і має перевагу для волокна з градієнтним показником профілю. Це пов'язано з тим, що енергія для реакції поставляється безпосередньо, а не через стінки трубки. Після нанесення основних матеріалів температура в печі підвищується до 2000 °С з подальшим розпадом кварцової трубки. Швидкість виробництва 0.5 г/хв(рис.4).

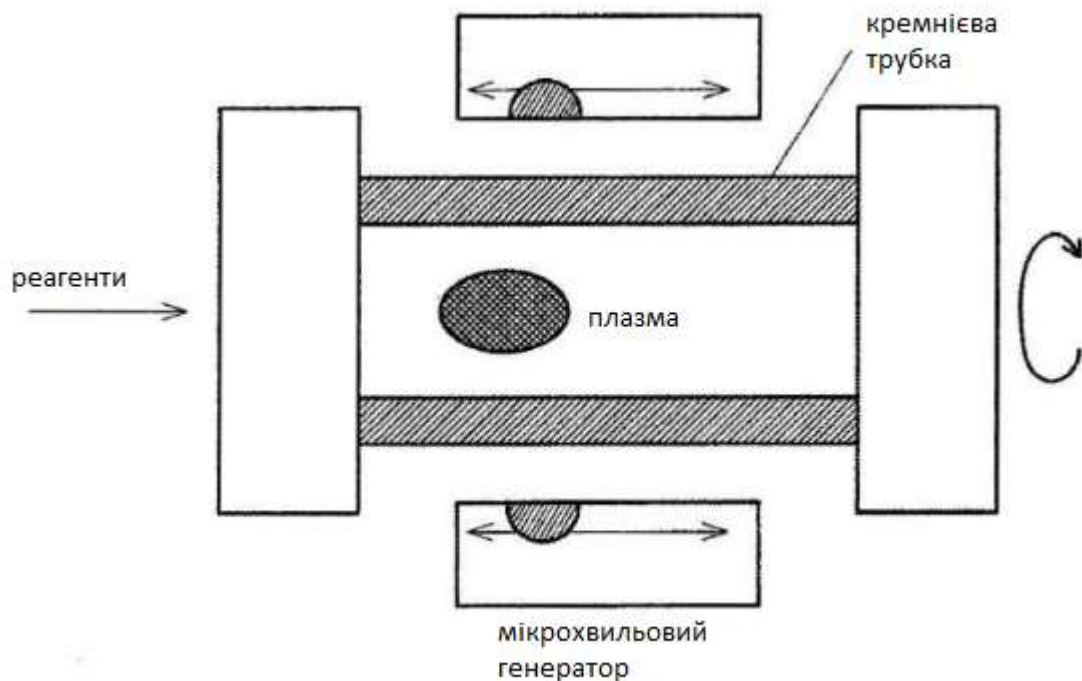


Рис. 2.4. Принцип виробництва методом OVD

Контролювати PCVD легше, ніж інші методи. Високі вимоги пред'являються до сировини. Інші параметри, такі як тиск в трубі, температура печі, енергія плазми, швидкість резонатора і т.д. істотно не впливають на результуючі параметри.

**Технологія VAD** розроблена в Японії компанією NTT, а виробництво було розпочато в Fujikura Cable Works Ltd., Sumitomo Electric Industries Ltd., і в інших компаніях. За допомогою цього методу частки, які пізніше формують ядро і оболонку, осідають на підкладку в осьовому напрямку і, таким чином, утворюється циліндр без центрального отвору. Важливо не тільки відсутність

будь-яких центральних отворів, що призводить до зниження втрат, а головним чином можливість постійної подачі заготовки. Склужання відбувається в електричній печі при температурі 1500 °C в атмосфері He-CO<sub>2</sub> або He-SiCl<sub>2</sub>, в якій відштовхується вода. В ході склужання, обсяг заготівлі зменшується в вісім разів і діаметр заготовки стає близько 2,5 см. Далі відбувається витягування до діаметра 1 см і переміщення в кварцову трубку.

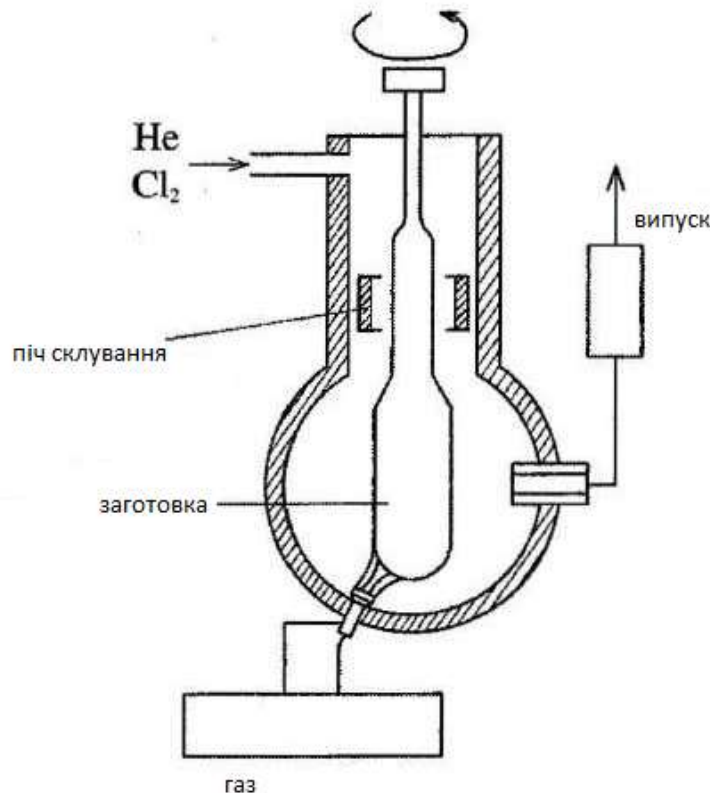


Рис. 4.5. Технологія PCVD

При використанні цієї технології відсутній центральний провал в профілі показника заломлення. Швидкість осадження 0.4 г/хв, з однієї заготовки можна виготовити більше 100 км волокна. Використовуючи цей метод, виробляють багатомодові і одномодові світловоди зі ступінчастим або градієнтним профілем, дуже малим загасанням (менше 1 дБ/км) і великою пропускною здатністю. Міцність на розрив волокна також висока.

Управління процесом VAD дуже ретельне. Переломлення залежить від розподілу температури по поверхні заготовки, положення і кута полум'я.

Витрата сировини, матеріалів, палива і вихлопних газів, швидкість обертання пористої заготовки і її положення повинні бути постійними. Збільшення швидкості осадження тягне за собою проблеми. Ефективність осадження  $\text{SiO}_2$  становить від 60 до 80%. У виробництві одномодового волокна, один пальник використовується для основного осадження і одна або більше пальників для нанесення оболонки.

#### **4.2. Технологія створення брегівських ґраток в оптичному волокні**

При виготовленні ВБГ до їх параметрів висуваються жорсткі вимоги. Найбільш важливими параметрами волоконних ґраток є розподіл амплітуди модуляції показника заломлення  $\Delta n(x)$  і закон зміни періоду  $\Delta \Lambda(x)$  ґратки вздовж поздовжньої осі волокна. Відхилення цих параметрів від необхідних значень призводить до погіршення спектральних характеристик ВБГ і роботи волоконно-оптичної лінії зв'язку в цілому.

ВБГ можуть виготовлятися (записуватися) різними методами, кожен з яких застосовується для конкретних структур ґраток і має свої переваги і недоліки. До сучасних тенденцій у розвитку методів виготовлення ВБГ слід віднести:

- обробку оптичних волокон газоподібним воднем при високому тиску для підвищення їх фоточутливості;
- активне застосування надкоротких лазерних імпульсів для виготовлення ґраток;
- запис ВБГ безпосередньо в процесі витяжки волоконного світловода і ряд інших.

В даний час найбільш часто використовуються наступні методи запису ВБГ:

- інтерференційні методи (однопроменевий і двопроменевий);
- метод фазової маски;
- метод точкового виготовлення.

Через малий період ВБГ їх виготовляють, як правило, з використанням інтерференційних методів. Так, як процес запису необхідної ґратної

структури може тривати кілька десятків хвилин, виготовлення якісної ґратки можливо лише при високій стабільності інтерференційної картини. Такі умови можуть бути забезпечені лише при хорошій просторової і часової когерентності фотоіндукуючого випромінювання, що накладає жорсткі вимоги на джерела випромінювання для запису ВБГ.

Запропоновано різні схеми записи ВБГ, в яких шляхом зведення пучків УФ-випромінювання під кутом  $\alpha$  утворюється інтерференційна картина з періодом інтерференції  $\Lambda$  (період ґратки). Період  $\Lambda$  визначається наступним рівнянням:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2\sin(\frac{\alpha}{2})}$$

де  $\lambda_{uv}$  - довжина хвилі УФ-випромінювання. Волоконний світловод, в якому здійснюється запис бреггівськими ґратками, поміщається в область інтерференції, і в пучностях інтерференційної картини в фоточутливої серцевині збільшується показник заломлення скла. Таким чином, період бреггівськими ґратки збігається з періодом інтерференційної картини  $\Lambda$ .

У першому інтерферометрі, який використовувався для запису брегговських ґраток, використовувалося поділ УФ-випромінювання за допомогою світлороздільної пластини на два пучка, які потім зводилися під кутом. Одна зі схем такого типу інтерферометрів представлена на рис 4.6. Для забезпечення високого контрасту інтерференційної картини світлоподільна пластина підбирається таким чином, щоб інтенсивність зводимих пучків була однаковою. Циліндрична лінза використовується для фокусування випромінювання на серцевині волоконного світловода. Інтерферометри з розподілом амплітуди володіють гнучкістю в реалізації параметрів ґраток (період, довжина), однак вимагають високої просторової і часової когерентності випромінювання. Крім того, інтерферометрам такого типу притаманні такі суттєві недоліки. По-перше, вони мають високу чутливість до механічної вібрації оптичних компонентів, субмікронні переміщення яких викликають зміщення інтерферометричний смуг. По-друге, оскільки

УФ випромінювання

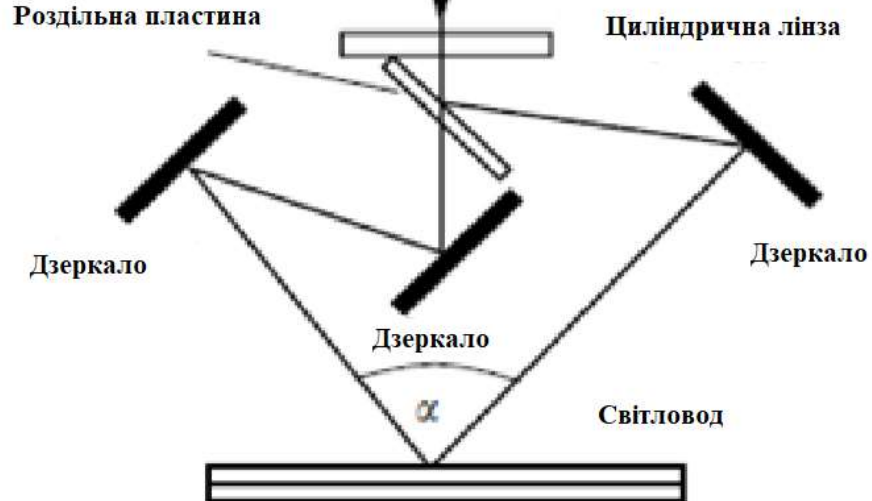


Рис. 4.6. Схема запису бреггівських ґраток в інтерферометрі з розподілом амплітуди

Багато в чому від зазначених недоліків вільні інтерферометр Ллойда і призмовий інтерферометр, представлені на малюнку 4.6 і 4.7. За допомогою діелектричного дзеркала (інтерферометр Ллойда) або призми (призмовий інтерферометр) дві половини УФ-пучка змішуються під кутом  $\alpha$ . Перебудова кута  $\alpha$  здійснюється шляхом повороту інтерферометра і світловода, що помітно простіше в порівнянні з попереднім типом інтерферометрів. В силу малого оптичного шляху і мінімальної кількості оптичних елементів ці інтерферометри відрізняються високою механічною стабільністю. Однак вимоги до когерентності УФ-випромінювання залишаються як і раніше високими, тому зазначені типи інтерферометрів переважно застосовуються з використанням випромінювання другої гармоніки даної операції. Найбільш поширеним під час запису різних типів ґраток з широким діапазоном їх параметрів є метод фазової маски. Він заснований на створенні варіацій фази при поширенні випромінювання через майстер-ґратку, що виготовляється

фотолітографічним способом, та перетворенні їх в періодичну модуляцію інтенсивності і потім - в профіль зі змінним показником заломлення в серцевині волокна з тим же періодом, що і в фазовій масці.

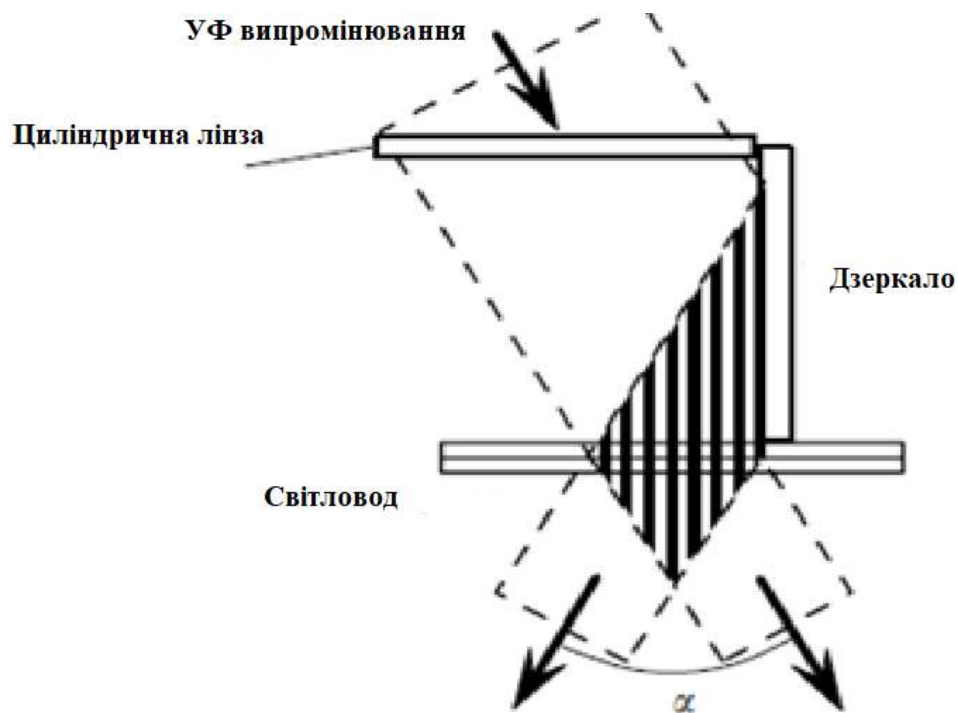


Рис. 4.6. - Схема запису бреггівських ґраток з використанням інтерферометра Ллойда

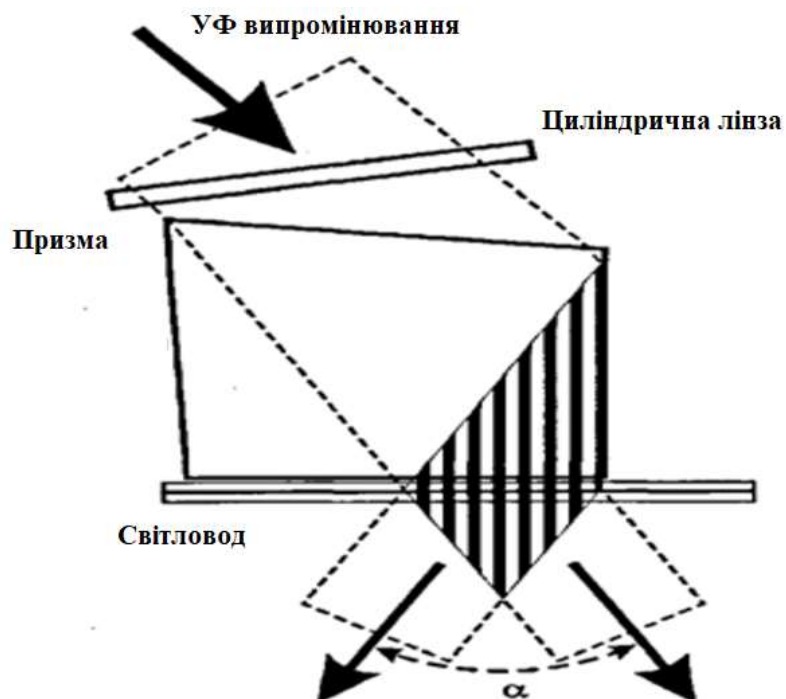


Рис. 4.7. Схема запису бреггівських ґраток з впровадженням призменного інтерферометра



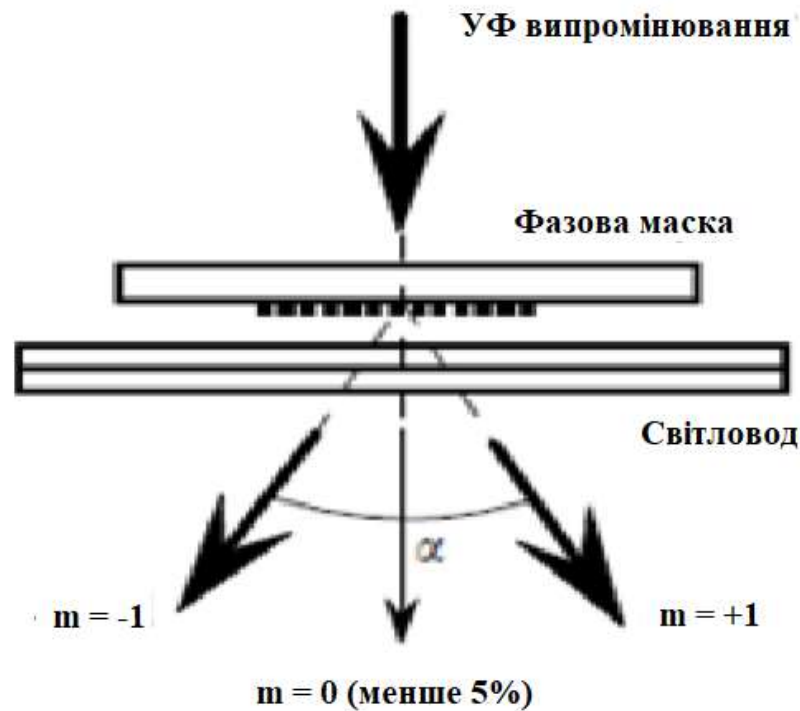


Рис. 4.8. Схема запису брегговських ґраток за допомогою фазової маски

Запис брегівських ґраток через фазову маску значно знижує вимоги до когерентності випромінювання, тому, як правило, застосовується з використанням ексимерних лазерних джерел. У цьому методі інтерферують перший і мінус перший дифракційні порядки  $m$  випромінювання, що пройшов через фазову маску з кварцового скла (рис. 4.8). Рельєф фазової маски виконаний таким чином, щоб придушити нульовий і інші порядки дифракції та забезпечити тим самим високий контраст інтерференційної картини.

Використання фазової маски є зручним для рутинного запису ґраток з фіксованими параметрами. Так як волоконний світловід поміщається в безпосередній близькості до фазової масці в ближньому полі дифракційних УФ-пучків, чутливість схеми до механічних вібрацій знижена. Фазові маски зі змінними по довжині параметрами дозволяють записувати складні типи ґраток (зі згладженої амплітудою модуляції ПП, зі змінним періодом і т.д.).

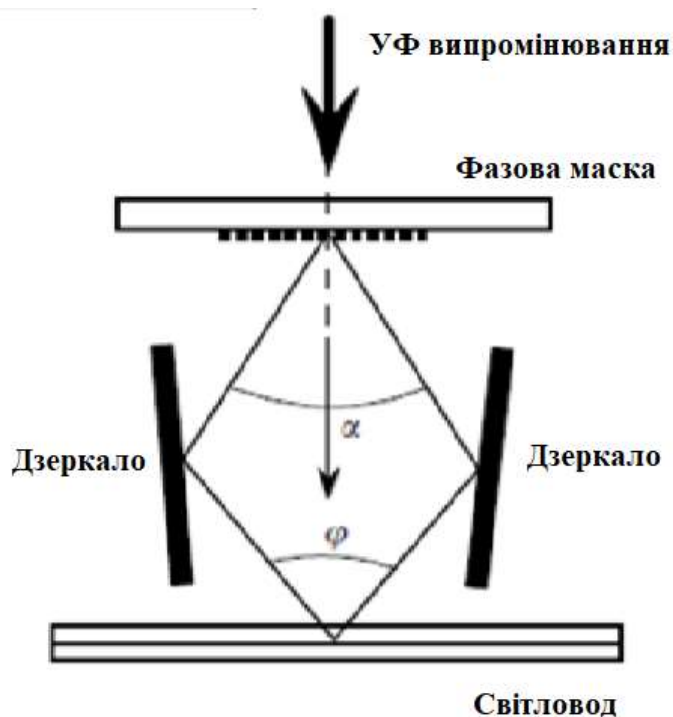


Рис. 4.9. Схема запису бреггівських ґраток в інтерферометрі Тальбота

Слід зазначити, що фіксованість параметрів запису одночасно є і недоліком обговорюваної схеми запису. Можлива лише невелика перебудова резонансної довжини хвилі ( $\sim 2$  нм) в довгохвильову область за допомогою зміни кута між фазовою маскою і світловодом.

Перебудова бреггівської довжини хвилі у відносно широких межах можлива в інтерферометрі Тальбота, схема якого наведена на рис. 4.9. При цьому відповідна перебудова кута інтерференції  $\varphi$  в цьому безконтактному методі запису з використанням фазової маски здійснюється синхронним поворотом дзеркал. Метод точкового виготовлення також має суттєві практичні обмеження, тому що дозволяє створювати тільки короткі (менше 1 см) ВБГ і не дає можливості контролювати з високою точністю формування окремих коротких секцій шириною менше одного періоду ґратки, що утворюють структуру ВБГ. Перераховані методи записи ВБГ є найбільш поширеними в силу їх відносної простоти і гнучкості параметрів. Разом з тим запропоновані й інші методи, які дозволяють виготовляти, в тому числі, спеціальні типи ґраток (ВБГ великої довжини, ВБГ зі зміною періоду і амплітуди модуляції по довжині ґратки і т.д.).

## **Висновок**

Ця глава була присвячена технології виготовлення ВБГ. За допомогою технології виготовлення ВБГ можливо розміщувати безліч датчиків в одній оптоволоконній лінії і виробляти абсолютні вимірювання без калібрування. Ці унікальні особливості роблять цю технологію найбільш підходящим і надійним рішенням для тривалого моніторингу.

Системи моніторингу, засновані на даній технології, економічно ефективні при використанні на великомасштабних об'єктах - там, де необхідна установка сотень датчиків для тривалих вимірювань різних фізичних параметрів. Волоконні бреггівські ґрати також є самим надійним рішенням при роботі з агресивними середовищами, де датчики знаходяться в екстремальних умовах.

## **5. ПРОПОЗИЦІЯ ДО СТАРТАП-ПРОЕКТУ**

За останні двадцять років величезна кількість інновацій в оптоелектроніці і в області волоконно-оптичних телекомунікацій призвело до значного зниження цін на оптичні компоненти і до значного поліпшення їх якості. Це дозволило волоконно-оптичним датчикам перейти з розряду експериментальних лабораторних приладів в розряд широко застосовуваних приладів, які викликають значний інтерес і вже забезпечують практичне застосування в області:

- волоконні лазери
- мультиплексні пасивні волоконно-оптичні датчики
- оптичні частотні мультиплексори для телекомунікаційних систем
- перебудовувані і фіксовані вузькосмугові фільтри
- компенсатори дисперсії в волоконно-оптичних лініях зв'язку
- частотно-селективні відгалужувачі і пристрої виведення світла з волокна
- лазерні діоди з бреггівськими ґратками в якості зовнішнього відбивача
- волоконно-оптичні підсилювачі

ВБГ можуть бути використані:

- в якості вимірників температури навколишнього середовища;
- як датчики лінійної деформації;
- можуть виконувати функцію сенсорних елементів в датчиках тиску;

### **Висновок до стартап-проекту**

У данному розділі були розроблені пропозиції до стартап проекту відповідно до теми магістерської дисертації «Дослідження волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами».

## ВИСНОВОК

Завдяки своїм унікальним характеристикам, оптоволоконні датчики на основі брегговських решіток знайшли своє застосування в багатьох областях, таких як будівництво і геотехніка, аерокосмічна, енергетична і нафтогазова промисловість.

Чутливими елементами точкових волоконно-оптичних датчиків є волоконні бреггівські ґрати, що записані в оптичному волокні за допомогою (найчастіше) ультрафіолетового лазера і являють собою ділянку світловода з періодичною зміною показника заломлення уздовж осі. ВБГ кожного датчика відображає світло певної довжини хвилі з шириною спектра.

При механічному і температурному впливі змінюються період і показник заломлення решітки, внаслідок чого ми спостерігаємо зміщення довжини хвилі відбитого світла. Вимірюючи величину цього зміщення, можна визначити відносну деформацію і зміну температури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Окоси Т. и др. 037 Волоконно-оптические датчики/Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.— 256 с: ил. ISBN 5-283-02466-0 (СССР); ISBN 4-274-03123-3 (Япония).
2. Основы волоконно-оптической связи: Пер, с англ./Под ред.. Е.М. Дианова. – М.: Сов.радио, 1980. – 232 с., ил.
3. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Б 92 Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения.— М.: Энергоатомиздат, 1990.-256 с: ил. ISBN 5-283-01523-8
4. Э.Удд. Волоконно-оптические датчики. М.:Техносфера, 2008. - 520с
5. Kincade, Kathy and Stephen Anderson (2005) "Laser Marketplace 2005: Consumer applications boost laser sales 10%", Laser Focus World, vol. 41, no. 1
6. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. 4-е изд. М.: Физический факультет МГУ, 2005. 282с. - с. 139 – 142
7. С. Тикадзуми Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. — М.: Мир, 1987. — 416 с.
8. Оптоелектроніка від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В.О. Чадюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – Кн. 1. -380 с.
9. С.В. Варжель Волоконные брэгговские решетки - Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015, 2015. - 65 с. - экз.
10. Труды Международного симпозиума «НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО»: Т78 в 2 т. - Пенза : ПГУ, 2015. – 2 том – 384
11. Середа П.В. Прецизионное определение параметров волоконных брэгговских решеток //Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург 2005.
12. С.Р. Giles, "Lightwave applications of fiber Bragg gratings", J. Lightwave Technol, 15 (8), pp.1391-1404,1997.

